

労災疾病臨床研究事業費補助金

デジタルトランスフォーメーションを活用した医療従事者の
被ばく低減プログラムの開発と有効性の検証

令和4年度～6年度 総合研究報告書

研究代表者 藤淵 俊王

令和7（2025）年3月

目 次

I. 総合研究報告

デジタルトランスフォーメーションを活用した医療従事者の被ばく低減プログラムの開発と有効性の検証	藤淵 俊王	-----	1
---	-------	-------	---

(資料) 分担研究報告

1. 放射線防護教育 web サイトおよびアクションチェックリストの作成と有効性の評価			
1.1 放射線防護教育 web サイトおよびアクションチェックリストの有効性の評価		-----	15

(参考資料)

1. アクションチェックリスト	-----	28
2. 放射線防護教育 web サイト	-----	33

2. VR/AR 放射線可視化教材

2.1 血管造影における 3 次元散乱線分布の可視化	-----	105
2.2 WebVRを利用したX線透視における放射線防護教材の開発	-----	126
2.3 Ray tracing を利用したリアルタイム散乱放射線分布計算	-----	138
2.4 X 線透視における方向ベクトルを利用した放射線防護板配置時の簡易線量分布計算法の検討	-----	143
2.5 仮想現実技術を利用した X 線透視時の散乱線の方向ベクトルの可視化教材の開発	-----	158
2.6 AR 技術による散乱線の可視化を利用した血管造影時の放射線防護教材の有効性の評価	-----	165

3. リアルタイム被ばく警告システム

3.1 リアルタイム被ばく警告システムの基本特性評価	-----	177
3.2 診断用 X 線におけるピンホールコリメータと高感度 CMOS カメラによるリアルタイムでの散乱線源の可視化	-----	187
3.3. 可搬型放射線可視化カメラによる X 線検査での散乱線源のイメージング	-----	195

II. 研究成果の刊行に関する一覧表	-----	203
--------------------	-------	-----

労災疾病臨床研究事業費補助金
総合研究報告書【令和4年度～令和6年度】

デジタルトランスフォーメーションを活用した医療従事者の被ばく低減プログラム
の開発と有効性の検証 (220201)

研究代表者 藤淵 俊王 九州大学大学院医学研究院保健学部門医用量子線科学分野 教授

研究要旨

研究の目的：2011年に国際放射線防護委員会（ICRP）で水晶体等価線量限度引下げの勧告が出て以降、国内では法令取入に向けた実態調査や被ばく低減対策の検討が進められてきた。医療現場における職業被ばくについて、被ばく量の高い放射線診療従事者も存在することから被ばく低減に向けた取組と有効性の評価が求められる。そこでこれまでの知見とデジタルトランスフォーメーションの技術を活用して実効性の高い放射線診療従事者の被ばく低減対策プログラムを開発し、被ばくの低減を図ることを目的とする。

研究結果の概要：

本研究において提案する被ばく低減プログラムは、デジタルトランスフォーメーション（DX）を活用したこれまでにない効率的なシステムの開発と有効性の評価を実施できる点が特色である。開発するコンテンツは上記背景の課題を解決策として、下記の3項目の放射線防護教材開発を実施した。

1. 放射線防護教育 web サイトおよびアクションチェックリストの作成と有効性の評価

本研究では、医療現場に対する職業被ばくの放射線防護教材を web サイトを作成し、電子教材として活用しやすいようまとめた。具体的な内容として、外部放射線防護の3原則やX線照射中の放射線の広がり方という基礎的な事項に加え、IVRや透視、CT等、様々な状況に応じた被ばく低減の要点について、放射線防護具の紹介や活用法、画像や動画を踏まえた資料を作成した。内容に関して臨床的および放射線医学・技術学教育の視点から、実務上理解しやすいものになるよう検討した。また、先行研究の情報を統合してアクションチェックリストを作成し、被ばく低減対策についての改善例を提示する資料も組み込んだシステムとした。その上で、構築したサイトとアクションチェックリストについてアンケート調査を、医療従事者の多忙な業務の中で、職業被ばく低減のため放射線防護について基本的で効率よく効果的な学習の機会の提供が望まれていること、アクションチェックリストは検査種類別に作成する必要があることが明らかになった。

最終年に構築したサイトとアクションチェックリストについて、使用前後の被ばく量の変化から有効性を評価と改善を実施した。全体の被ばく量は、使用前の令和4年度が実効線量 0.49 mSv、水晶体等価線量 1.41 mSv、皮膚等価線量 1.47 mSv に対し、使用後の令和5年度では 0.37 mSv、0.94 mSv、1.02 mSv に全て低下した。アクションチェックリストは、現場の状況に応じて項目を細分化し、令和6年度版は防護具や線量計の種類等具体的に80項目、7部門（小線源治療追加）に追加した。

2. 3次元放射線可視化教材

放射線業務を行う上で、放射線は目に見えないことが放射線診療従事者にとって放射線や防護の理解を妨げる要因となっている。放射線の「見える化」による放射線診療中の検査室内の散乱線の広がり認識し、放射線防護に関する理解度を向上させることを目的に教材を開発した。

VR/ARを活用した放射線防護教材として、Ray Tracingという計算技術を活用してX線透視場における放射線防護板や医療従事者の移動による散乱線分布の変化をリアルタイムに推定する手法、モンテカルロ計算による散乱ベクトル情報を基にした放射線防護板の移動に伴う散乱線分布の簡易計算手法を考案した。計算に時間をかけた計算に比べ精度は劣るものの、数秒で放射線防護板等の位置の影響を反映できる教材としての活用が期待できる。また、放射線防護教育の目的で散乱線の広がり方の視覚的な理解を深めるためにVRゴーグルによる散乱線可視化教材を開発した。またiPadを利用した血管造影検査におけるAR放射線防護教材の有効性を理解度や教材の充実度等から評価し、本教材は放射線防護教育を実施する上でモチベーションの高めることに有効であることを実証した。

3. リアルタイム被ばく警告システム

これまでリアルタイムに線量計で測定することが困難であった手指等の末梢や眼を含め、全身の被ばく量分布をボディトラッキング技術を利用してリアルタイムに推定し、医師や看護師に音や画像で提示することで被ばく低減につなげるシステムを開発した。また、高感度散乱線可視化カメラを開発し、医療スタッフへ飛んでくる散乱線をリアルタイムに可視化することで、適切な遮蔽板の配置やその効果を確認するシステムを開発した。開発した3次元散乱線分布と医療従事者のボディトラッキングシステムと組み合わせることで、臨床現場での詳細な医療従事者の被ばく推定に役立てられる。

研究分担者

石神 康生	九州大学大学院医学研究院 臨床放射線科学分野 教授
小川 佳宏	九州大学大学院医学研究院 病態制御内科学 教授
馬場 眞吾	九州大学大学院医学研究院 保健学部門 医用量子線科学分野 教授
岡崎 龍史	産業医科大学 産業生態科学研究所 教授
富澤 登志子	弘前大学大学院 保健学研究科 教授
磯田 拓郎	九州大学病院 放射線部 講師 (令和5, 6年度)
坂本 和生	九州大学病院 冠動脈疾患治療部 助教 (令和5, 6年度)

筒井 裕之	九州大学大学院医学研究院循環器内科学教授 (令和4年度)
佐々木 雅之	九州大学大学院医学研究院保健学部門医用量子線科学分野教授 (令和4年度)

研究協力者

牛島 泰宏	九州大学病院 放射線科 講師
藤森 尚	九州大学病院 肝臓・膵臓・胆道内科 助教
荒川 弘之	九州大学大学院医学研究院 保健学部門 医用量子線科学分野 助教
Han Donghee	九州大学大学院医学研究院 保健学部門 医用量子線科学分野 助教
中島 美沙希	九州大学大学院医学系学府保健学専攻 大学院生
岸田 大典	九州大学大学院医学系学府保健学専攻 大学院生
檜作 響子	九州大学大学院医学系学府保健学専攻 大学院生
Lee Hyojin	九州大学大学院医学系学府保健学専攻 大学院生
境 真由	九州大学大学院医学系学府保健学専攻 大学院生
野口 昂生	九州大学大学院医学系学府保健学専攻 大学院生
田渕 麻央	九州大学大学院医学系学府保健学専攻 大学院生
川島 理愛	九州大学医学部保健学科放射線技術科学専攻 学部生
長友 亜未	九州大学医学部保健学科放射線技術科学専攻 学部生
矢野 祐二	九州大学医学部保健学科放射線技術科学専攻 学部生
宇都宮 史子	九州大学医学部保健学科放射線技術科学専攻 学部生

A. 目的

2011 年に国際放射線防護委員会（International Commission of Radiological Protection: ICRP）で水晶体等価線量限度引下げの勧告が出て以降、国内では法令取入に向けた実態調査や被ばく低減対策の検討が進められてきた。放射線診療従事者の中でも業務内容と被ばくとの関係を調査すると、X 線管に接近して操作が必要な透視下手技に携わる医師や看護師の被ばくが特に高いことが明らかになっている。法令改正後も線量限度を超過する可能性のある放射線診療従事者が存在し、その要因として以下のことが考えられる。

1. 医療現場の実務に即した放射線防護教材の不足

放射線防護教材は多く用意されているが、被ばくに関する概念・法令・理論に関するものがほとんどで、放射線診療従事者の実務に反映することが難しいように感じる。より理解しやすくするために、放射線診療従事者に対して事前に放射線被ばくの軽減の重要性を説明するとともに臨床現場のスタッフの視点で、様々な理解度や業務内容、さらに所持している防護具に応じた教材が求められる。

2. 放射線は五感に感じないこと

放射線は五感に感じないことから、危険を察知しづらい。放射線の広がりや危険な場所を可視化、可聴化することで危険を予知することが可能になると考えられる。

3. 放射線防護具の適正な使用法をはじめとした放射線防護法の理解不足

被ばく低減対策として放射線防護眼鏡や防護板の有効性が報告され活用されているが、現場で所持しているだけでなく適切に使用しないと防護効果を発揮できない。手技によっては装置や患者と緩衝してしまうことから、全ての放射線診療で利用できるわけではない。防護具だけでなく、照射条件や人員配置等から総合的に対策をする必要がある。

医療現場における職業被ばくについて、被ばく量の高い放射線診療従事者も存在することから被ばく低減に向けた取組と有効性の評価が求められる。そこで本労災疾病臨床研究では、これまでの知見と“放射線の可視化”をキーワードとして、デジタルトランスフォーメーション（DX：digital transformation）の技術を活用した放射線診療従事者の被ばく低減対策プログラムを開発し、被ばくの低減を図ることを目的とする。

1 年目は放射線防護教育 Web サイトの構築と仮想現実（virtual reality：VR）、拡張現実（augmented

reality：AR）を利用した放射線防護教材の開発、リアルタイム被ばく警告システムの開発を実施した。2 年目には作成した放射線防護教育 web サイトおよびアクションチェックリストのアンケート調査による有効性の評価および、VR/AR を利用した新たなモダリティでの放射線可視化教材の開発、リアルタイム被ばく警告システムの性能評価を実施した。

3 年目は、これまでに作成した放射線防護教育教材およびアクションチェックリストの有効性の評価と改善、VR/AR 放射線可視化教材として放射線防護板等室内の状況に応じた散乱線分布推定の高速化と教材の有効性の評価、リアルタイム被ばく警告システムとして、放射線可視化カメラを X 線診療現場での散乱線源検出用に設定を最適化し、散乱線源をリアルタイムにイメージングする手法を開発した。

B. 方法

B-1 放射線防護教育教材およびアクションチェックリストの作成と有効性の評価

B-1.1 放射線防護教材の有効性の検証

放射線防護教材の有効性の検証方法として、教材使用前後の放射線診療従事者の年間実効線量、等価線量から、有効性を評価した。対象は研究分担者の所属する九州大学病院に所属する放射線資料従事者の内、放射線科医師 5 名、肝臓・膵臓・胆道内科医師 8 名、循環器内科医師 14 名、放射線部診療放射線技師 37 名の計 65 名である。九州大学臨床試験倫理審査委員会での承認を受け（課題番号 22013）、研究に対する同意を得た対象者に令和 5 年 3 月に教材を使用していただき、令和 4 年 4 月から令和 5 年 3 月と、令和 5 年 4 月から令和 6 年 3 月までの 1 年ずつの実効線量、水晶体等価線量、皮膚等価線量の情報を取得した。

また構築したサイトとアクションチェックリストについてアンケート調査を実施した。対象は研究分担者の所属する九州大学病院の放射線科、循環器内科、肝臓・膵臓・胆道内科、放射線部、産業医科大学病院の整形外科、放射線部（看護師含）、弘前大学病院の放射線部所属の看護師で、職種別の回答数として、医師 45 名、看護師 24 名、診療放射線技師 81 名の計 150 名である。

放射線診療に従事する放射線科、肝臓・膵臓・胆道内科、循環器内科、整形外科計 24 名に対し、職業被ばくに関するアンケート調査を実施した。質問内容として下記の 4 項目について自由記載方式で回答を収集した。

B-1.2 IT 技術を活用した医療職への効果的・効

率的な教育の提供に関する調査

文献検索を基に、近年企業の社員教育や教育現場で取入れられている情報を収集した。その中で、ジャストインタイム・トレーニング (Just In Time : JIT)、マイクロラーニング (Micro-Learning : ML)、アダプティブラーニング (Adaptive Learning : AL) というキーワードが注目されている教育手法として浮かび上がってきた。これらの教育手法についてその概要や医療従事者への適応について検討した。

B-2 VR/AR 放射線可視化教材の開発

B-2.1 血管造影における 3 次元散乱線分布の可視化

放射線の「見える化」による放射線診療中の検査室内の散乱線の広がり認識し、放射線防護に関する理解度を向上させることを目的に、モンテカルロシミュレーションを基に放射線診療室内の散乱線分布を計算し、PC やタブレット端末等で場所を問わず容易に確認するシステムを構築した。

B-2.2 WebVR を利用した X 線透視における放射線防護教材の開発

血管造影室での心臓カテーテル検査および X 線透視検査での散乱線分布表示において WebVR によりソフトのインストール不要で動作する環境や、iPad や iPhone に対応した AR アプリを開発した。

B-2.3 Ray tracing を利用したリアルタイム散乱放射線分布計算

最初にシミュレーションにより X 線検査室について先行研究のデータを基としてオーバーチュアテーブル型 X 線装置で患者を仰臥位に寝かせて天井床方向に照射した場を再現し、基準データとした。Ray tracing を利用したアプリケーションの開発について、Unity(2020.3.20f1)を利用した。並列計算の効率化のために、Unity DOTS (Data-Oriented Technology Stack)を利用したプログラムを含めた。X 線撮影において、室内の散乱放射線の多くは患者から発生し、患者から発生した散乱放射線は室内の空気中で散乱することなく直線的に進行するという仮定とした。仮想 X 線室において、仰臥位での透視における患者の体表面から体外に広がる散乱放射線の方法ベクトル、エネルギー情報を取り込んだ。

仮想 X 線診療室内には 3 人の医療スタッフと放射線防護板を配置した。医療スタッフを室内に配置し散乱放射線と衝突した際、散乱放射線の進

行方向と防護板の位置に応じて室内の散乱放射線分布が瞬時に変化するようにした。X 線診療室には複数の線量評価点を含む医療スタッフ 3D モデルを配置し、マウス操作で室内を移動できるようにした。また医療スタッフモデルの両眼、甲状腺、胸部中心、腹部中心、腰部中心、右指先、左指先に評価点を置くことで、その位置における各評価点を算出できるようにした。

シミュレーション精度を検証するため、室内 36 点でモンテカルロシミュレーションと本シミュレーションによる比較をした。

B-2.4. 方向ベクトルを利用した放射線防護板配置時の簡易線量分布計算法の検討

モンテカルロコードである Particle and Heavy Ion Transport code System (PHITS)を使って X 線透視装置で患者を模したファントムを照射したときの透視室内の散乱線の挙動をシミュレーションした。簡易線量分布計算で使用する透視室内のフルエンス分布と周辺線量当量分布を主要な 3 つの散乱線源ごとに分けてシミュレーションした。主要な 3 つの散乱線源は、ファントムからの散乱、X 線管からの散乱、その他とした。簡易線量分布計算法に使用する方向ベクトルデータを PHITS シミュレーションの計算結果を利用して作成した。

簡易線量分布計算法では、PHITS シミュレーションで得た周辺線量当量分布と作成した方向ベクトルのデータを用いた。方向ベクトルの情報から放射線防護板で遮蔽される光子を推定し、その光子の線量値に線量低減係数をかけた。ここで、前回の研究で防護板による線量の低減率は最も良い条件で 99%であったため、線量低減係数は 0.01 とした。

B-2.5. VR 技術を利用した X 線透視時の散乱線の方法ベクトルの可視化教材の開発

モンテカルロコードである Particle and Heavy Ion Transport code System (PHITS) C アーム式 X 線透視装置 (以下、C アーム装置) で照射したときの患者を模したファントムからの X 線透視室内の散乱線の挙動をシミュレーションした。放射線防護用教材の開発を目的としており、被写体からの後方散乱による医療従事者への影響が大きいことからオーバーテーブル X 線管の配置とした。X 線を照射した場合、散乱線に比べ直接線の成分は桁違いに多い。今回は検査室内にいる医療従事者の放射線防護教育の観点から全体に広がる散乱線を観察することが目的であるため X 線を照

射した際の直接線の成分を除き、患者からの散乱線のみを表示させた。方向ベクトル分布の作成には、透視室における PHITS による光子フルエンスの 3 次元分布データの計算結果を利用した。周辺線量分布の作成には、3 次元のフルエンス分布から、PHITS に含まれるフルエンス-周辺線量当量換算係数を用いて変換した。

三次元可視化ソフト ParaView ver. 5.13.0 (Kitware, Inc., NY, USA) を使用して散乱線の方
向ベクトルを赤色の矢印として表示した。
ParaView VR 機能を利用して VR 空間に方向ベ
クトル分布を表示した。VR ヘッドセット (Meta
Quest 3; Meta Platforms, Inc., CA, USA) を使用した。

B-2.6. AR 技術による散乱線の可視化を利用した 血管造影時の放射線防護教材の有効性の評価

モンテカルロシミュレーションにより、心臓の
血管造影時の散乱線分布のデータを C アームの角
度別に PA (Posterior-Anterior), LAO (Left Anterior
Oblique) 60°, RAO (Right Anterior Oblique) 30°,
Cranial 30°, Caudal 25°の 5 種類、防護板の有無で
2 種類の計 10 種類を計算した。ゲーム開発エン
ジンである Unity ver.2022.2.181 に取り込み、メ
ニュー画面で C アームの角度 変更や防護板の有無
の変更、カラースケールの変更、二次元断面はア
キシャル方向、サジタル方向、コロナル方向に動
かすことが可能で、3 方向から任意の断面を選択
し散乱線分布を確認することができるようにし
た。

今回は 5 種類の C アームの角度を用意したこと
を考え、放射線防護の三原則をもとに、C アーム
の角度変化による散乱線分布の変化、防護板使用
による散乱線分布の変化、患者からの距離による
被ばくの変化の 4 つのシナリオを作成した。また、
それぞれのシナリオにおいて理解度を測るため
の○×問題を作成した。

診療放射線技師養成校に所属する 3 年生、29 名
に実際に作成したアプリケーションを用いて、シ
ナリオに沿って演習を行い、ARCS モデルを用い
た教材の評価、○×問題、自由記載による教材の評
価を実施した。

B-3. リアルタイム被ばく警告システム

B-3.1 リアルタイム被ばく警告システムの基本 特性評価

X 線室内の散乱線の線量分布は、モンテカルロ
コードを用いてシミュレーションした。得られた
データは拡張現実 (AR) マーカーを使用して可視

化され、関節点ごとの線量はボディトラッキング
によって推定した。さらに、任意の二次元断面を
表示する機能などを追加した。

B-3.2. 診断用 X 線におけるピンホールコリメ ータと高感度 CMOS カメラによるリアルタイムで の散乱線源の可視化

散乱線源をシンチレータにより可視光に変換
してイメージングするため、CMOS カメラ (ORCA-
Quest、浜松ホトニクス)、ヨウ化セシウム (CsI) シ
ンチレータ (Great Performance X-ray CsI Scintillator
J13113、浜松ホトニクス)、RGB カメラ (Intel
RealSense Depth Camera D435、Intel Corporation、米
国)、ピンホールコリメータ、を使用した。ピンホ
ールコリメータとシンチレータの距離は 2 cm、シ
ンチレータとカメラの距離は 9 cm に設定した。

X 線照射は X 線管装置 (UD150L-30、島津製作
所) を用い腹部 X 線撮影の条件 (74 kV、250 mA、
0.14 s) で、ファントムから 150 cm の位置にカメ
ラを配置し、カメラの露光時間を 2 から 200 ms に
設定し撮影した。散乱線画像と背景の RGB 画像
を合成ソフトにより重ね合わせ表示した。取得し
た画像の画質を評価するために、S/N 比 (SNR) とコ
ントラストを用いて解析した。またモンテカルロ
シミュレーションにより照射およびカメラへの
散乱線の入射の状況を再現し、画像の整合性やコ
リメータサイズの最適化を検討した。

B-3.3. 可搬型半導体式放射線可視化カメラによ る X 線検査での散乱線源のイメージング

本研究では、放射線可視化カメラ MiniPIX EDU
KIT (ADVACAM 社) を X 線透視 C アーム装置に
は DR CALNEO CROSS (富士フイルム) 使用した。
半導体検出器の前 1.7 cm に直径 1 mm の鉛ピン
ホールを配置し、ファントムから 100 cm の位置
にカメラを配置して散乱線源をイメージングし
た。さらに、可搬型の放射線防護板を X 線管付近
に配置し、X 線管からの散乱線の遮蔽効果をイメ
ージングした。

(倫理面への配慮)

本研究の実施にあたり、厚生労働省・文部科学
省の「人を対象とする医学系研究に関する倫理指
針」に基づき、アンケート調査や被ばく量調査等
の実施に対して、各研究施設での倫理審査委員
会で承認を得た後、参加者から同意書を得て研究
を実施した。X 線を使用する研究では、研究者が被
ばくする恐れがあるため、放射線防護対策をし
た上で研究実施した。

利益相反情報は必要に応じて各研究機関のCOI委員会の審査を受けた。

C. 結果

C-1 放射線防護教育教材およびアクションチェックリストの作成と有効性の評価

C-1.1 放射線防護教材の有効性の検証

全体の被ばく量は、使用前の令和4年度が実効線量 0.49 mSv、水晶体等価線量 1.41 mSv、皮膚等価線量 1.47 mSv に対し、使用後の令和5年度では 0.37 mSv、0.94 mSv、1.02 mSv に全て低下した。診療科別では循環器内科医師が使用前平均 1.46 mSv と比較的高く使用後では被ばく量が半減したのに対し、他の診療科、部では使用前から 1 mSv 未満で同等か若干上昇した。ただし統計的有意差は認められなかった。

Web サイトに対するアンケートの結果、医療従事者への効果的な放射線防護教育教材として、多忙な業務の中で、職業被ばく低減のため放射線防護について基本的で効率よく効果的な学習の機会の提供 (web サイトやEラーニング) が望まれていることが明らかになった。また放射線診療は様々な部門で扱われており、装置や場の状況に応じた適切な防護対策の教材が求められ、アクションチェックリストは検査種類別に作成する必要があることが明らかになった。

放射線診療を実施する各診療科医師への放射線防護教育へのアンケートの結果からは、職業被ばくに対する意識や関心が高まっていることが確認できた。中でも被ばくによる影響の具体的な事例を知りたいという要望が多く、医療現場での事例の周知が望まれていることが明らかとなった。

アクションチェックリストは、現場の状況に応じて項目を細分化し、防護具や線量計の種類等具体的に 80 項目、7 部門 (小線源治療追加) のものを作成した。

IT 技術を活用した医療職への効果的・効率的な教育の提供に関する調査の結果、JIT は必要な知識やスキルを即座に学習できる方式で、適時性・関連性・効率性・柔軟性を備えたトレーニング手法である。医療分野においても、JIT トレーニングは限られた時間内での学習機会の提供に有効であり、特に周術期看護師のスキル向上に貢献できる。さらに、個々の学習者の特性に応じたマイクロラーニング (ML) やアダプティブラーニング (AL) が適応性の高い学習法として挙げられていた。ML は短時間で学習できるモジュール型教育、AL は AI を活用し学習者に最適な教材を提供する

方式である。生成 AI の進化により、学習内容の個別最適化も可能になり、精度向上に向けた技術開発が進んでいることが明らかになった。

C-2 VR/AR 放射線可視化教材の開発

C-2.1 血管造影における3次元散乱線分布の可視化

角度や防護の有無による散乱線分布の違いが確認できた。散乱線分布の可視化により、危険な位置や放射線防護具の適切な配置位置を容易に把握することができた。

C-2.2 WebVR を利用した X 線透視における放射線防護教材の開発

心臓カテーテル検査において、角度毎の防護具がある場合とない場合の線量分布に関する WebVR、血管造影検査中の X 線曝射時の 3D アニメーション、本アプリケーション用の放射線防護教材を作成した。

X 線透視用 WebVR には、冠状断、矢状断、横断面散乱線分布の表示、3 次元散乱線等線量面の表示、アニメーション、複数点での線量の値を表示できる機能を作成した。

C-2.3 Ray tracing を利用したリアルタイム散乱放射線分布計算

この情報を基に X 線診療室内の散乱放射線量分布を計算した。モンテカルロシミュレーションに対する本手法で散乱放射線量の算出値の比は、X 線装置の裏側などを除き、ほとんどが 0.7 から 1.8 倍の範囲内だった。防護板を移動に伴い、散乱放射線分布もスムーズに変化した。

C-2.4 方向ベクトルを利用した放射線防護板配置時の簡易線量分布計算法の検討

実測と PHITS シミュレーションの低減率の差は 6%以内であった。一方で、実測と PHITS シミュレーション、簡易線量分布計算法の低減率の差は、防護板の床からの高さ 110 cm、120 cm、130 cm のとき低減率の差は 10%以内であった。しかし、防護板の床からの高さ 140 cm のとき、実簡易線量分布計算法は他より、低減率が非常に低かった。簡易線量分布計算とシミュレーションの計算時間を比較した結果、簡易線量分布計算は平均 13 秒、PHITS シミュレーションは平均 20 時間 39 分 46 秒かかった。簡易線量分布計算は PHITS シミュレーションと比べて非常に計算時間が短くなった。

ファントムからの距離 35 cm の位置を術者の位

置として線量プロファイルを作成し、PHITS シミュレーションと簡易線量分布計算を比較した。線量プロファイルから防護板の後方の領域の境界周囲では差が大きくなった。

C-2.5 仮想現実技術を利用した X 線透視時の散乱線の方向ベクトルの可視化教材の開発

作成したデータにより、VR 空間にて C アーム X 線透視装置での照射時における散乱線の進行方向を三次元的に矢印で可視化するとともに、任意の方向から確認できた。また、2 次元および 3 次元の線量分布と重ね合わせることで防護板による遮蔽効果を視覚的に確認できた。

C-2.4. AR 技術による散乱線の可視化を利用した血管造影時の放射線防護教材の有効性の評価

○×問題の正答率は C アームの角度変化による散乱線分布の変化の問題は 65.5%、72.4%となり、その他の問題は 100%となった。C アームの角度変化は血管造影検査特有の変化であり、他に比べて理解が難しいことがわかった。ARCS モデル教材の学習意欲向上度の評価では、平均点は Attention が 4.15、Relevance が 3.91、Confidence が 3.93、Satisfaction が 4.28 だった今回の教材はモチベーションの向上に有効であることが明らかになった。自由記載にはアプリケーションの操作性の改善点が挙げられ、特にアプリケーションの操作が難しいことがわかった。

C-3. リアルタイム被ばく警告システム

C-3.1 リアルタイム被ばく警告システムの基本特性評価

これまでリアルタイムに測定することが困難であった末梢や眼を含め、全身の被ばく量分布をボディトラッキング技術を利用してリアルタイムに推定し、医師や看護師に音や画像で提示することで被ばく低減につなげるシステムのプロトタイプを開発した。線量推定精度と術者の位置の検出精度を検証した結果、床から 100 cm の点で計算値が過小評価となっていた。医療スタッフのトラッキングについては、カメラからの距離と、死角の有無に応じて検出精度が異なるが、 ± 5 cm 程度であった。

C-3.2 診断用 X 線におけるピンホールコリメータと高感度 CMOS カメラによるリアルタイムでの散乱線源の可視化

散乱線源をイメージングした結果、ピンホールサイズ 2 mm では、散乱線源の形状や分布が比較

的鮮明に観測され、より高い空間分解能を実現した。対照的に、3 mm のピンホールサイズでは、2 mm のピンホールと比較して分布が広くなり、空間の詳細解像度が著しく低下した。これは、ピンホールのサイズが散乱線源の視覚化に大きく影響することを示している。また、ピンホールコリメータに到達する線量率は $10.71 \mu\text{Sv/s}$ 、総線量は $2.10 \mu\text{Sv}$ であった。

SNR とコントラストはどちらも、カメラの露光時間が長くなるにつれて全体的に増加する傾向を示した。ピンホールサイズが 2 mm と 3 mm の場合、露光時間が長くなると SNR とコントラストが向上したが、2 つのピンホールサイズ間で間隔が異なった。

シミュレーションデータと測定データの両方に、水ファントムと X 線管からの散乱放射に対応する 2 つの顕著なピークが見られた。ピンホールのサイズに関しては、ピンホールの直径が 2 mm の場合、ピーク分離と空間分解能が向上するのに対し、ピンホールの直径が 3 mm の場合、ピークが近接する代わりにシグナル強度が高くなった。

これらの知見は、リアルタイムイメージングシステムが散乱放射を効果的に可視化し、PHITS シミュレーションがシステムのパフォーマンスを最適化および評価するための信頼性の高いフレームワークを提供することを裏付けている。

C-3.3 可搬型半導体式放射線可視化カメラによる X 線検査での散乱線源のイメージング

本カメラにより散乱線源をイメージングした結果、焦点側から寝台側に向かってコリメータ、射出口、ファントム表面、の 3 カ所が主な散乱線源を確認することが出来た。

防護板を X 線射出口と同じ位置に配置した場合はコリメータにおける散乱が遮蔽され、防護板をさらに 5 cm 下方に配置した場合はコリメータだけでなく射出口における散乱も遮蔽することを視覚的に確認できた。

ファントムが無い場合、コリメータと射出口からの散乱の様子に目立った変化は見られず、わずかながら寝台において散乱線が発生した。散乱線のおよそ半分がファントムから発生していること、そしてファントムの有無で X 線管内の散乱線は変わらないことが分かった。

D. 考察

D-1 放射線防護教育教材およびアクションチェックリストの作成と有効性の評価

D-1.1 放射線防護教材の有効性の検証

今回の放射線防護教材の有効性の調査結果から明らかになったこととして、全体の平均線量は使用後で 70%程度低下したが、統計的有意差は認められなかった。高被ばく者について、2 年間での大きな違いはなく、放射線診療に従事する業務量の問題が大きく聞いている可能性がある。また放射線防護対策が不足しているかは本調査からは不明であり、高被ばくとなることの原因究明には、直接的な介入が必要である。放射線防護教材の有効性の評価を実施する上で考えられる課題を下記に挙げる。対象者について、今回多くの対象者は 2 mSv 未満の被ばく(6 割近くは 0)で、変化が確認しづらかった。これは、放射線防護教材を使用する前から十分な対策が出来ている可能性があり、調査する際の施設のバックグラウンドにより教材の効果が異なることを示唆する。

今回は教材の使用前後での被ばく量の比較から評価をしたが、他の放射線教育、講習の機会により被ばく低減効果があっても判別が出来ない。これは今回の有効性の評価法のデザインでの問題点である。2021 年の電離放射線障害防止規則等での水晶体等価線量限度の引き下げに伴い、労働基準局からの案内の他、関係学会等でも特集の記事を組んだり学会シンポジウムとして企画したりするなど放射線診療従事者の自分自身の被ばくに対する関心が高まっている。これらの他の放射線防護意識の向上に対するバイアスは排除できず、被ばく量だけからでは教材の真の有効性を図ることに限界があった。

職業被ばくに対する意識や関心が高まっていることが確認できた。中でも被ばくによる影響の具体的な事例を知りたいという要望が多く、医療現場での事例の周知が望まれている。医療現場での職業被ばくによる放射線影響の事例を紹介することは、自身の被ばくを他人事とすることなく、対策をした上で放射線を扱わないと自分が被害を受ける可能性があることとして主体的に防護対策に取り組む契機となる可能性がある。また他施設の良い防護対策の事例を紹介しあうことは、自施設で実施できるかどうかは別として参考知識として活用でき、対策例を広く集め自由に閲覧できるような環境、設備を構築することが有効であると考えられる。

教材の運用方法について、教材やアクションチェックリストを作成するだけでなく、これらをいつどのように使用するかが、効果な活用に重要である。また放射線診療を実施する場合も幅広く、モ

ダリティや職種により放射線防護方法が大きく異なる。そのため、基礎的な項目として一般的な放射線防護方法の説明をする教材も必要ではあるが、現場の状況に応じた放射線防護対策の教材作成が求められる。これは厳密にはモダリティ別に作成するだけでなく、個々の医療機関によっても備えられている放射線防護具や部屋の大きさ、機種、業務量や担当する職種などが異なり、細かな状況に応じた放射線防護教育の最適化ができればよいが、現状では放射線防護教材や E-learning では一般的なことしか示すことが出来ず、一方通行の説明となり、ここが大きな限界となっている。そのため教材作成だけでなく、対象者とのコミュニケーションを取りやすい環境を構築することが細かな放射線防護対策には重要となる。

IT 技術を活用した医療職への効果的・効率的な教育の提供に関する調査について、限られた業務時間の中でできるだけ短くわかりやすい情報を好み、全般的に人の注意力は年々低下し、デジタル化のライフスタイルが長時間の集中を妨げている。それ故、医療人材については、JIT を実施し、効率的かつ適切な教育を行い、またこうした人材育成については正確性、関連性のある教育に対して適時性を考慮して行えるように整備していくことが求められる。放射線に関する教育もその専門性のレベルにより提供の仕方も AI によって調整は可能となるが、系統的な教育ではなく、個別のレディネスと経験によって提供内容を変更する方向に進んでいくと考えられる。

D-2 VR/AR 放射線可視化教材の開発

D-2.1 血管造影における 3 次元散乱線分布の可視化

散乱線分布の可視化により、危険な位置や放射線防護具の適切な配置位置を容易に把握することができた。表示ツールについても特徴を理解し、それぞれの環境に合ったものを使用すべきである。

D-2.2 WebVR を利用した X 線透視における放射線防護教材の開発

本教材はインストール不要で OS を問わず実施可能である。一方使用する端末のスペックにより動作が遅くなることがあり、快適な操作の実施にはプログラムを出来るだけ軽くする必要がある。

D-2.3 Ray tracing を利用したリアルタイム散乱放射線分布計算

本システムは、計算精度に問題があり改善の余地があるものの、直感的な放射線防護板の移動に

よる散乱線分布の変化のリアルタイムな把握が可能であり、配置の自由度の高い防護板の使用において、都度散乱放射線分布を測定することは現実的でなく、簡易的に散乱放射線分布やスタッフの線量の変化を確認することで、防護板の適切な配置方法の直感的な理解につながる。

D-2.4. 方向ベクトルを利用した放射線防護板配置時の簡易線量分布計算法の検討

簡易線量分布計算法では、モンテカルロシミュレーションと比べて計算時間は非常に短くなったことから、防護板の位置による線量分布の変化を簡単に多くの結果を示すことができると考える。簡易線量分布計算では、防護板後方の領域の領域は大部分の線量値が過小評価になる。しかし、防護板後方の領域の境界では、線量値が過大評価になる。また、実測や PHITS シミュレーションとの差が大きくなる傾向がある。簡易線量分布計算法では、防護板の遮蔽の影響を受けるおおよその領域を知ることができる。しかし、空間の線量値は実測や PHITS シミュレーションとの差が大きい場合もあるため、線量値の確認に用いることは難しい。

D-2.5. 仮想現実技術を利用した X 線透視時の散乱線の方向ベクトルの可視化教材の開発

今回開発した VR 教材により、VR 空間にて方向ベクトル分布を矢印として表示することで、透視装置、患者、防護板、自分の視点の位置関係と紐づけて散乱線の進行方向を確認することができる。そのため、患者の傍に立ったときに散乱線がどこから自分の方に向かってくるかがモニター画面を見るよりも容易に視覚的に理解しやすい。VR 教材での視線の変更は、ボリュームレンダリング等の 3 次元画像を表示するソフトウェアのようなマウスによる操作でなく、VR ゴーグルを装着している頭を動かすことで微妙な視線を容易に変化させることが出来る。また VR ゴーグルを装着することで現実世界が完全に遮断され、余計な物のない没入感のある仮想空間で見たいものだけを表示させることが出来る。これらのことから、VR 空間で学習する教育教材では、より主体性をもって学習できると考える。一方、本研究の限界として、方向ベクトルの表示方法、照射条件や防護板の位置が限定されている点、医療従事者等の使用による本教材の客観的な評価が行えていない点が今後の課題として挙げられる。本教材は、防護板の有無や複数の線量分布、ベクトル表示方法から散乱線の進行方向や適切な防護板の

配置場所を理解できるよう設計したものであるが、理解度の確認のために確認テストを実施や、目的達成のためのシナリオが適切だったか、使い勝手などのアンケートから教材の質を上げていく必要がある。

D-2.6. AR 技術による散乱線の可視化を利用した血管造影時の放射線防護教材の有効性の評価

True or false quiz の結果より、C アームの角度による散乱線分布の変化は C アームを使った血管造影検査における特有の現象であり、今後シナリオを改善する際により詳細にすることが望ましいと考える。今回の演習は対象者を診療放射線技養成校の学生を対象としたため、基本的な放射線に関する知識を持っていたことが正答率に表れたと考える。

演習について理解は進んでいるため今後は演習内容の調節を行い、より多くの知識を提供することで、成長できたという自信を提供することができるのではないかと考えている。平均値を見ると Attention、Satisfaction の値は 4 を上回り、Relevance、Confidence の値も 4 に近い値となった。このことより今回の演習シナリオは教材としては良いものであると考える。

自由記載についてアプリケーションの複数の改善点が挙げられたため、テキストマイニングの結果においてアプリケーション内のオブジェクトおよび操作面についての単語が多く挙げられたと考えられる。

今後は他の医療従事者を目指す学生に向けた学習教材を作成する際は、より放射線について基礎的なシナリオを作成する必要がある。アプリケーションについては、操作性に改善の余地がある。また、C アームの角度や防護板の位置、照射条件などが固定となっているため、条件の自由度が低く、その点が実際の医療現場と異なる点に留意が必要である。さらには、今回の散乱線分布の表示方法では、散乱線の進む方向までを示すことができていない。今後は、アニメーションや矢印により、放射線の広がり方を示すことが期待される。

D-3. リアルタイム被ばく警告システム

D-3.1 リアルタイム被ばく警告システムの基本特性評価

本研究で開発したシステムはボディトラッキングと散乱線の可視化技術を活用し、散乱線と術者の位置との関係を、VR 内でリアルタイムに把握することができる。その結果、本システムは安全上のリスクとなる高線量被ばくの可能性がある

る場所を直感的に把握できる貴重なツールである。さらに、従来の個人線量計は体の特定の部位に基づいて被ばく線量を測定していた。しかし、本研究の衝突判定を用いたアプローチにより、線量計の位置に関係なく術者の指先や頭部などの被ばく線量をリアルタイムで推定することが可能となる。これらの機能により X 線検査室内における散乱線の理解が深まるため、放射線防護教育に有用であると考ええる。

線量推定精度と術者の位置の検出精度を検証した結果、寝台からの散乱線の考慮が不十分であることが考えられ、より精密な寝台情報を登録したシミュレーションが必要である。

D-3.2. 診断用 X 線におけるピンホールコリメータと高感度 CMOS カメラによるリアルタイムでの散乱線源の可視化

本研究では、高感度 CMOS カメラを用いて散乱光のリアルタイム可視化を実施し、ピンホールサイズや露光時間の影響を評価した。最適な露光時間は 50 ms であり、短すぎる場合はノイズが増加することが判明した。また、線量率は 10.71 $\mu\text{Sv/s}$ であり、一般 X 線撮影に適用可能と示された。システムのセットアップエラーを抑えるためには標準化が必要であり、ピンホールサイズ 2 mm が最も鮮明な画像を提供することが確認された。シミュレーションと実測データの比較では、一部差異があり、精度向上が今後の課題となる。本技術は放射線安全管理に貢献し、不必要な被ばくを減らす可能性を示した。

D-3.3. 可搬型半導体式放射線可視化カメラによる X 線検査での散乱線源のイメージング

本研究では、防護板の高さが X 線管内からの散乱線低減に効果的であることを確認した。射出口より低く設置すると遮蔽効果が高まるため、手技の妨げにならない範囲での低い設置が推奨される。照射野を小さくするとファントムからの散乱線が減少したが、コリメータからの散乱線は増加した。ファントムの有無にかかわらず散乱線源の画像化が可能であり、寝台が散乱線源になり得ることが示された。課題として、再現性向上のためのピンホール固定法の見直し、カメラ視野の一致精度向上が挙げられ、3D プリンタを活用した土台設計が有効と考えられる。今後、防護板の高さやコリメータの種類の検討を進める必要がある。

E. 結論

E-1 放射線防護教育教材およびアクションチェックリストの作成と有効性の評価

本研究において、放射線診療中従事者の被ばく量から放射線防護教材の有効性を検証した。平均被ばく量は資料使用後に低下したが、統計的有意差は確認できなかった。放射線診療を実施する医師へのアンケート調査からは、放射線業務での放射線影響や対策に関する事例の情報の共有が望まれていること、様々な放射線診療の現場に応じた防護対策とそのサポートが望まれる。

医療人材の育成において、JIT、ML、AL の活用は有効であり、特に AI の進化に伴いさらに高度な学習環境が整えられる。今後、医療放射線防護教育などの専門教育にも適用され、個々の学習ニーズに応じた調整が進むと考えられる。

E-2 VR/AR 放射線可視化教材の開発

Ray tracing 技術や簡易計算法を活用することで、X 線診療室内の散乱放射線分布をリアルタイムに計算、表示させるアプリケーションを作成した。これらのシステムにより診療時の被ばく低減を意識した医療スタッフの位置や適切な放射線防護板の使用方法を理解するために有効な教育ツールになることが示唆された。一方で計算精度は十分でないことから、今後はシミュレーション精度の向上と多くの照射条件、モダリティへの対応を目指す必要がある。

放射線防護教育での VR の活用は、透視装置、患者、防護板と使用者の視点の位置関係と紐づけて散乱線の進行方向を把握できるため、教育教材として有用であると示唆される。

AR 放射線防護教材の評価結果から、学習意欲の向上についてこの教材は有効であることがわかった。一方で教材によって得ることのできる知識は、医療従事者でも職種により大きく異なることから、職種に応じたシナリオの改善や細分化が必要である。

E-3. リアルタイム被ばく警告システム

本研究では、X 線透視下で作業する医療従事者のトラッキングに基づき各部位の線量を推定するシステムを開発した。またピンホールコリメータを用いて複数の半導体式画像検出器（カメラ）により、臨床現場の照射条件で、リアルタイムに散乱線源を特定する能力を有することを実証した。これらのシステムを組み合わせ、また 3 次元散乱線源分布を取得することで、放射線診療中に医療従事者の詳細な被ばく量の推定や術者の散乱線防護方法の検討に利用できると考える。

F. 研究発表

1.論文発表

1. Fujibuchi, T. Study on Radiation Protection Educational Tool Using Real-Time Scattering Radiation Distribution Calculation Method with Ray Tracing Technology, Information, 16, 266, 2025.
2. Noguchi K, Fujibuchi T, Han D, Effectiveness of radiation protection educational material during angiography using visualization of scattered radiation by augmented reality technique. Radiological Physics and Technology, 2025.
3. Hyojin Lee, Toshioh Fujibuchi, Donghee Han, Hiroyuki Arakawa, Visualization of the scatter radiation in real time using a high-sensitivity CMOS camera with pinhole collimator, Health and Technology, 2025.
4. Hizukuri K, Fujibuchi T, Han D, Arakawa H, Furuta T, Directional vector-based quick evaluation method for protective plate effects in X-ray fluoroscopy (DQPEX), Radiological Physics and Technology, 18, 196-208, 2025.
5. Sakai, M; Fujibuchi, T; Lee, H; Han, D, Imaging of scattered radiation sources in X-ray radiography using a semiconductor radiation visualization camera, Radiological Physics and Technology, 18, 308 – 315, 2025.
6. Fujibuchi, T.; Arakawa, H.; Anam, C. Development of a Real-Time Radiation Exposure Estimation Method Using a Depth Camera for Radiation Protection Education. Radiation, 4, 261-275, 2024.
7. Fujibuchi T, Nakashima M, Arakawa H, Miyazaki H, Anam C. Evaluation of radiation protection effectivity in a cardiac angiography room using visualized scattered radiation distribution. J Radiol Prot., 44, 031510, 2024
8. Arakawa H, Fujibuchi T, Kaneko K, Okada Y, Tomisawa T, Radiation-training system with a custom survey-meter mock-up in a browser-based mixed reality environment, Nuclear Engineering and Technology, 56, 2428-2435, 2024.
9. 矢野 祐二, 藤淵 俊王, 荒川 弘之, 含鉛および無鉛素材の放射線防護衣における透過 X線スペクトルや鉛当量,均一度の評価, 日本放射線技術学会雑誌, 80, 944-954, 2024
10. 藤淵俊王, 水晶体被ばくに関わる近年の動向, 日本放射線技術学会 放射線防護部会誌, 24, 14-31, 2024
11. 藤淵俊王, 水晶体被ばくに関わる近年の動向, インナービジョン, 40, 22-23, 2025.

2. 学会発表

1. Misaki Nakashima, Toshioh Fujibuchi, Kazuki Nishi. Consideration of Method for Displaying 3D Scattered Radiation Distribution in Angiography Room using Web Browser. The 78th annual meeting of the JSRT, Yokohama, April 14-17, 2022
2. 中嶋美沙希, 藤淵俊王, 荒川弘之, 宮崎仁志. Webブラウザで動作する血管造影検査室内の散乱線分布表示による防護教材の構築. 第4回日本保健物理学会・日本放射線安全管理学会 合同大会, Fukuoka, November 24-26, 2022.
2. Kenta Honiden, Toshioh Fujibuchi. Development of a warning system for radiation exposure during X-ray fluoroscopy by monitoring the surgeon's position using a depth camera. The 78th annual meeting of the JSRT, Yokohama, April 14-17, 2022.
3. 本井傳健太, 藤淵俊王, 荒川弘之. 深度カメラを利用した術者位置モニタリングによる X線透視時の職業被ばく推定システムの開発. 第4回日本保健物理学会・日本放射線安全管理学会 合同大会, Fukuoka, November 24-26, 2022.
1. 厚生労働省労災疾病臨床研究の取り組み、放射線安全フォーラム 第79回放射線防護研究会 2023.6.17
4. 医療従事者の職業被ばく低減を目的とした放射線防護教育webサイトの構築、第9回福岡線診療放射線技師会学術大会 2023.6.24
5. IVRにおける放射線防護教育について、第81回九州循環器撮影研究会 2023.7.8
6. Development of AR Visualization Teaching Materials for 3D Scatter Radiation Distribution in an X-ray Examination Room Using a Head-Mounted Display, The 42nd JSST Annual International Conference on Simulation Technology (2023.8.31)
7. 放射線診療従事者の被ばく低減対策用リアルタイム被ばく推定ARアプリの開発, 日本放射線技術学会秋季学術大会 2023.10.29
8. X線透視業務での術者線量推定と放射線防護の最適化の検討手法の提案、第18回九州放射線医療技術学術大会 2023.11.3
9. 労災疾病臨床研究事業「デジタルトランスフォーメーションを活用した医療従事者の被ばく低減プログラムの開発と有効性の検証」の紹介、第12回九州モニタ研究会 2023.12.2
10. 攻めの放射線防護 -医療従事者への放射線防護教育の実践と課題-、愛夢の会 2024.1.13

11. Kyoko Hizukuri, Toshioh Fujibuchi, Hiroyuki Arakawa. Consideration of appropriate barrier placement methods using visualization of scattered radiation in X-ray fluoroscopy. The 79th annual meeting of the JSRT, Yokohama, April 13-16, 2023.
12. Kenta Honiden, Toshioh Fujibuchi, Hiroyuki Arakawa. Development of an Occupational Exposure Estimation System during X-ray Fluoroscopy by Body Tracking Using a Depth Camera. 7th International Symposium on the System of Radiological Protection, Tokyo, November 6-9, 2023
13. Kyoko Hizukuri, Toshioh Fujibuchi, Hiroyuki Arakawa. Proposal of Direction Vector Visualization of Scattered Radiation for the Purpose of Appropriate Use of Radiation Protection Plates. The 7th International Symposium on The System of Radiological Protection (ICRP 2023), Pre-recorded video, November 6-9, 2023.
14. Kyoko Hizukuri, Toshioh Fujibuchi, Hiroyuki Arakawa. Direction Vector Visualization of Scattered Radiation for fluoroscopy by PHITS. Joint Symposium on Nuclear Data and PHITS in 2023, Ibaraki, November 15-17, 2023.
15. 檜作響子, 藤淵俊王, 荒川弘之. X線透視における散乱線の方向ベクトル分布の可視化. 医用画像情報学会 令和5年度春季(第198回)大会, 福岡, 2024年2月3日.
16. Hiroyuki Arakawa, Toshioh Fujibuchi, Yoshihiro Okada, Kosuke Kaneko, Toshiko Tomisawa, Investigation of patient release examination training in nuclear medicine using Mixed Reality, JSST2023, 2023.8, (Niigata)
17. Toshioh Fujibuchi, Hiroyuki Arakawa, Takashi Yoshinaga, Development of AR Visualization Teaching Materials for 3D Scatter Radiation Distribution in an X-ray Examination Room Using a Head-Mounted Display, JSST2023, 2023.8, (Niigata)
18. Kyoko Hizukuri, Toshioh Fujibuchi, Hiroyuki Arakawa. A study of a simplified dose calculation method using directional vectors when placing radiation protective plates. The 80th annual meeting of the JSRT, Yokohama, April 11-14, 2024.
19. Mayu Sakai, Hyojin Lee, Toshioh Fujibuchi, Hiroyuki Arakawa, Consideration of realtime imaging of scattered radiation sources in X ray fluoroscopy using a semiconductor camera, The 80th annual meeting of the JSRT, Yokohama, April 11-14, 2024.
20. Koki Noguchi, Toshioh Fujibuchi, Hiroyuki Arakawa, Creation of Radiation Protection Educational Material by Visualization of Scattered Rays during Tube Angiography Using AR Technology, The 80th annual meeting of the JSRT, Yokohama, April 11-14, 2024.
21. Toshioh Fujibuchi, Hiroyuki Arakawa, Development of real-time scattered radiation distribution display application according to the position of radiation protection plate, The 80th annual meeting of the JSRT, Yokohama, April 11-14, 2024.
22. Toshioh Fujibuchi, Hiroyuki Arakawa, Creation and implementation of educational scenarios aimed at understanding optimization of radiation protection in fluoroscopy using Extended Reality, The 80th annual meeting of the JSRT, Yokohama, April 11-14, 2024.
23. 藤淵 俊王, 医療被ばくにおける実効線量の正しい使い方, 日本放射線技術学会 第6回放射線影響と防護量の考え方を学ぶ Web セミナー, 2024.7.31
24. Toshioh Fujibuchi Radiation protection using digital transformation in the medical field, KYUDAI NOW 2024, Bandung, Indonesia, 2024.8.28.
25. Mayu Sakai, Toshioh Fujibuchi, Consideration of real-time imaging of scattered radiation sources in X-ray fluoroscopy using a semiconductor camera, KYUDAI NOW 2024, Bandung, Indonesia, 2024.8.28.
26. 藤淵 俊王, XR の医療放射線分野への活用, 日本医学物理学会 市民公開講座, 福岡, 2024.8.16.
27. 藤淵俊王, 富澤登志子, Extended reality を利用した放射線診療従事者向け医療放射線防護教育教材の開発と実践, 第67回日本放射線影響学会, 北九州, 2024.9.25-28.
28. Hyojin Lee, Toshioh Fujibuchi, Hiroyuki Arakawa, Consideration of real-time scattering ray imaging using a high-sensitivity CMOS camera, The 13th Korea - Japan Joint Summer Workshop in Radiological Sciences and Technology, Busan, Sep. 2-14, 2024.
29. Koki Noguchi, Toshioh Fujibuchi, Creation of Radiation Protection Educational Material by Visualization of Scattered Rays during Tube Angiography Using AR Technology, The 13th Korea - Japan Joint Summer Workshop in Radiological Sciences and Technology, Busan, Sep. 2-14, 2024.
30. Kyoko Hizukuri, Toshioh Fujibuchi, Simplified Dose Distribution Calculation Method for Placing Radiation Protective Plate Using Directional Vectors, The 13th Korea - Japan Joint Summer Workshop in Radiological Sciences and

- Technology, Busan, Sep. 2-14, 2024.
31. Kyoko Hizukuri, Toshioh Fujibuchi, Hiroyuki Arakawa, Donghee Han. Development of simplified dose distribution calculation program for radiation protective plate placement using directional vectors. The 24th Asia-Oceania Congress of Medical Physics (AOCMP 2024), Penang, October 10-13, 2024.
 32. Hyojin Lee, Toshioh Fujibuchi, Hiroyuki Arakawa, Donghee Han. Consideration of real-time visualization of scattered rays using a high-sensitivity CMOS camera. The 24th Asia-Oceania Congress of Medical Physics (AOCMP 2024), Penang, October 10-13, 2024.
 33. Toshioh Fujibuchi, Education on optimizing radiation protection in X-ray fluoroscopy using extended reality, The 24th Asia-Oceania Congress of Medical Physics (AOCMP 2024), Penang, October 10-13, 2024.
 34. Donghee Han, Toshioh Fujibuchi, An evaluation of human phantom applicability of 3D-printed filaments by dose measurement of Monte Carlo simulations and radiophotoluminescence glass dosimeters, The 24th Asia-Oceania Congress of Medical Physics (AOCMP 2024), Penang, October 10-13, 2024.
 35. 境 真由, Lee Hyojin, 藤淵 俊王, 荒川 弘之, Han Donghee, 可搬型半導体式放射線可視化カメラによる X 線透視での散乱線源のイメージングの検討. 第 1 回日本放射線医療技術学会大会(JCRTM 2024), 沖縄, 2024 年 10 月 31 日-11 月 3 日.
 36. 檜作 響子, 藤淵 俊王, 荒川 弘之, Han Donghee. Virtual reality 技術を利用した X 線透視時の散乱線の方向ベクトルの可視化. 第 1 回日本放射線医療技術学会大会(JCRTM 2024), 沖縄, 2024 年 10 月 31 日-11 月 3 日.
 37. 野口昂生, 藤淵 俊王, AR 技術を利用したモバイル C アーム透視装置および CT 装置の散乱線可視化による放射線防護アプリケーションの作成. 第 1 回日本放射線医療技術学会大会(JCRTM 2024), 沖縄, 2024 年 10 月 31 日-11 月 3 日.
 38. 田渕 麻央, 檜作 響子, 藤淵 俊王, Ray tracing を利用した X 線透視室内の散乱線分布可視化システムの開発と精度検証. 第 1 回日本放射線医療技術学会大会(JCRTM 2024), 沖縄, 2024 年 10 月 31 日-11 月 3 日.
 39. Lee Hyojin, 藤淵俊王, Han Donghee. 高感度 CMOS カメラを用いた X 線 CT 検査時の散乱線源の可視化による放射線防護対策の検討. 第 1 回日本放射線医療技術学会大会(JCRTM 2024), 沖縄, 2024 年 10 月 31 日-11 月 3 日.
 40. 藤淵 俊王, 水晶体被ばくに係る近年の動向. 第 1 回日本放射線医療技術学会大会(JCRTM 2024) 情報提供講座③, 沖縄, 2024 年 11 月 1 日.
 41. Mayu Sakai, Toshioh Fujibuchi, Consideration of real-time imaging of scattered radiation sources in X-ray fluoroscopy using a semiconductor camera, Kyushu University Asia week, Fukuoka, 2024.11.5-9.
 42. 藤淵 俊王, 藤淵 俊王, 水晶体被ばくに係る近年の動向. 日本医学物理学会 2024 年度ベシクセミナー, 2024 年 12 月 6-26 日.
 43. Lee Hyojin, 藤淵俊王, Han Donghee. 高感度 CMOS カメラとデブスカメラを用いた散乱線源の 3 次元イメージングに関する検討. 第 19 回九州放射線医療技術学会大会, 宮崎, 2024 年 12 月 21 日-12 月 22 日.
 44. 田渕 麻央, Lee Hyojin, 藤淵俊王. 診療用 X 線管におけるターゲット内の相互作用を再現した散乱線分布のモンテカルロシミュレーションの検討. 第 19 回九州放射線医療技術学会大会, 宮崎, 2024 年 12 月 21 日-12 月 22 日.
 45. Toshioh Fujibuchi, Donghee Han, Education on optimizing radiation protection in X-ray fluoroscopy-guided procedures using extended reality, PHITS Workshop and Intermediate Course at Japan Atomic Energy Agency in Tokai, Japan 2025, February 18-21, 2025.
 46. Kyoko Hizukuri, Toshioh Fujibuchi, Han Donghee, Development of Directional vector-based Quick evaluation method for Protective plate Effects in X-ray fluoroscopy (DQPEX), PHITS Workshop and Intermediate Course at Japan Atomic Energy Agency in Tokai, Japan 2025, February 18-21, 2025.
- G. 知的所有権の取得状況
1. 特許取得
なし
 2. 実用新案登録
なし
 3. その他
なし

労災疾病臨床研究事業費補助金
総合（令和4年度～令和6年度）分担研究報告書
デジタルトランスフォーメーションを活用した医療従事者の被ばく低減プログラム
の開発と有効性の検証（220201）

放射線防護教育 web サイトおよびアクションチェックリストの有効性の評価

研究代表者 藤淵 俊王 九州大学大学院医学研究院保健学部門医用量子線科学分野 教授

研究要旨

血医療現場における職業被ばくについて、被ばく量の高い放射線診療従事者も存在することから被ばく低減に向けた取組と有効性の評価が求められる。そこで本研究では、これまでの知見を活用し、また画像や動画等のコンテンツを充実させわかりやすく実効性の高い放射線診療従事者の被ばく低減対策教材を取りまとめたポータルサイトを作成した。使用前後の放射線診療従事者の年間実効線量、等価線量から、有効性を評価した。対象は研究分担者の所属する九州大学病院の放射線科、循環器内科、肝臓・膵臓・胆道内科、放射線部の放射線診療従事者65名である。同意を得た対象者に、令和5年3月に教材を使用していただき、令和4年4月から令和5年3月と、令和5年4月から令和6年3月までの1年ずつの実効線量、水晶体等価線量、皮膚等価線量の情報を取得した。また各診療科の医師に職業被ばくに関するアンケート、構築した放射線防護教育教材 web サイトの更新とアクションチェックリストについてアンケート調査を実施した。

全体の被ばく量は、使用前の令和4年度が実効線量 0.49 mSv、水晶体等価線量 1.41 mSv、皮膚等価線量 1.47 mSv に対し、使用後の令和5年度では 0.37 mSv、0.94 mSv、1.02 mSv に全て低下した。診療科別では循環器内科医師が使用前平均 1.46 mSv と比較的高く使用後では被ばく量が半減したのに対し、他の診療科、部では使用前から 1 mSv 未満で同等か若干上昇した。ただし統計的有意差は認められなかった。アクションチェックリストは、現場の状況に応じて項目を細分化し、令和6年度版は防護具や線量計の種類等具体的に 80 項目、7 部門（小線源治療追加）に追加した。

アンケートの結果、医療従事者への効果的な放射線防護教育教材として、多忙な業務の中で、職業被ばく低減のため放射線防護について基本的で効率よく効果的な学習の機会の提供（web サイトやEラーニング）が望まれていることが分かった。また放射線診療は様々な部門で扱われており、装置や場の状況に応じた適切な防護対策の教材が求められ、アクションチェックリストは検査種類別に作成する必要があることが明らかになった。この結果を受け、部門別に調整したアクションチェックリストを作成した。

放射線診療を実施する各診療科医師への放射線防護教育へのアンケートの結果からは、職業被ばくに対する意識や関心が高まっていることが確認できた。中でも被ばくによる影響の具体的な事例を知りたいという要望が多く、医療現場での事例の周知が望まれている。他施設の良い防護対策の事例を紹介しあうことは、自施設で実施できるかどうかは別として参考知識として活用でき、対策例を広く集め自由に閲覧できるような環境、設備を構築することが有効であると考えられる。

研究分担者

石神 康生	九州大学大学院医学研究院 臨床放射線科学分野 教授
筒井 裕之	九州大学大学院医学研究院 循環器内科学 教授
小川 佳宏	九州大学大学院医学研究院 病態制御内科学 教授
佐々木 雅之	九州大学大学院医学研究院 保健学部門 医用量子線科学分野 教授
馬場 眞吾	九州大学病院 放射線部 准教授
岡崎 龍史	産業医科大学 産業生態科学研究所 教授
富澤 登志子	弘前大学大学院 保健学研究科 教授

研究協力者

牛島 泰宏	九州大学病院放射線科 講師
坂本 和生	九州大学病院循環器内科 助教
藤森 尚	九州大学病院肝臓・膵臓・胆道内科 助教

A. 研究目的

医療現場における職業被ばくについて、被ばく量の高い放射線診療従事者も存在することから被ばく低減に向けた取組と有効性の評価が求められる。多くの分野で利用される放射線防護教材は多く用意されているが、被ばくに関する概念・法令・理論に関するものがほとんどで、放射線診療従事者の実務に反映できないものもある。より理解しやすくするために、放射線診療従事者に対して事前に放射線被ばくの軽減の重要性を説明するとともに臨床現場のスタッフの視点で、様々な理解度や業務内容、さらに所持している放射線防護具に応じた教材が求められる。そこで本研究では、これまでの知見を活用し、また画像や動画等のコンテンツを充実させわかりやすく実効性の高い放射線診療従事者の被ばく低減対策教材を取りまとめた web サイトとアクションチェックリストを作成した。作成した教材はアンケート調査とインタビューにより、本サイトや資料の改善点を洗い出し、資料の充実を図るとともに放射線防護教材の有効性を検証した。

また近年注目されている IT 技術を活用した教育手法に関して文献調査により情報を収集し、医療従事者への効果的かつ効率的な教育の可能性に関して検討した。

B. 研究方法

B-1. 放射線防護教育 web サイトの構築

Web サイトの構成として下記のようにした

1. はじめに

1. 1 本臨床研究の背景

1. 2 新着情報
2. 放射線防護の重要性
 2. 1 医療従事者への放射線防護の重要性
 2. 2 人への放射線影響
 2. 3 医療従事者の放射線障害の事例
3. 職業被ばくの線量限度と実態
 3. 1 被ばくの分類
 3. 2 放射線業務従事者の線量限度
 3. 3 推奨合値等価線量限度引き下げの経緯
 3. 4 改正電離放射線障害防止規則のポイント
 3. 5 国内の放射線診療従事者の水晶体被ばくの実態
4. 線量評価・モニタリング
 4. 1 個人線量計
 4. 2 外部被ばく線量の評価法
 4. 3 個人モニタリング結果の活用
5. 医療現場での放射線防護の原則
 5. 1 医療現場における外部放射線防護の原則
 5. 2 医療放射線での散乱線の特徴
 5. 3 遮蔽による放射線防護・放射線防護具の利用
 5. 4 時間による放射線防護・照射時間の短縮
 5. 5 距離による放射線防護・散乱線分布の把握
 5. 6 照射条件・手技による防護
 5. 7 X 線装置の管理
 5. 8 X 線透視における従事者防護の要点
 5. 9 医療従事者からよくある質問
6. 部門別防護対策
 6. 1 職業被ばく低減で医療現場に求められること
 6. 2 一般撮影・ポータブル撮影（病棟、手術

室等)

- 6. 3 X線透視（非血管系）
- 6. 4 血管造影
- 6. 5 CT検査
- 6. 6 核医学・PET検査
- 6. 7 放射線治療
- 6. 8 放射線管理室
- 7. アクションチェックリスト
- 8. 放射線防護教材・関連資料
- 8. 1 WebVR/AR 散乱線可視化教材
- 8. 2 AR X線室散乱線可視化アプリ X-SERVE
- 8. 3 可視化ソフト ウェア ParaView
- 8. 4 関連資料
- 8. 5 リンク集

従来の紙面の教科書と異なり電子教材であることから、視覚的に理解しやすいよう画像や動画等の視聴覚教材をできるだけ多く用意した。能動的な理解ができるよう他の分担研究で報告するWebVR教材とリンクさせた。さらに説明内容の根拠を明確にするために、公的機関や文書、論文とリンクさせた。作成したサイトを研究分担者間でレビューし、改善内容を検討した。

B-2 放射線防護教育 web サイトに関するアンケート

昨年度構築した放射線防護教育サイトとアクションチェックリストについてアンケート調査を実施した。対象は研究分担者の所属する医師、診療放射線技師、看護師である。

アンケート項目を以下に示す。

Q1 医療機関名、Q2 所属部署、Q3 職種、Q4 主な担当業務、Q5 氏名

Q6 アクションチェックリストと各項目の解説資料内容は理解できたか？

Q7 上の質問で「いいえ」の場合、わかりづらい項目や不明な内容

Q8 今回の放射線防護のためのアクションチェックリストに加えたほうが良い、または除いたほうが良いと思うこと

Q9 アクションチェックリスト以外に行っている被ばく低減対策

Q10 放射線業務について、身体的影響の不安があるか

Q11 上の質問で「はい」の場合、何に不安があるか（複数回答可）

Q12 被ばく対策について、不安なことや知り

たいこと、その他自由記載

さらに放射線看護専門看護師6名にweb上でインタビューを行い、教材の提示方法や医療現場での放射線教育の在り方、教材加えるべき内容、現場での課題について討論会を実施した。

B-3 放射線防護教材の有効性の検証

放射線防護教材の有効性の検証方法として、教材使用前後の放射線診療従事者の年間実効線量、等価線量から、有効性を評価した。対象は研究分担者の所属する九州大学病院に所属する放射線資料従事者の内、放射線科医師5名、肝臓・膵臓・胆道内科医師8名、循環器内科医師14名、放射線部診療放射線技師37名の計65名である。九州大学臨床試験倫理審査委員会での承認を受け（課題番号22013）、研究に対する同意を得た対象者に令和5年3月に教材を使用していただき、令和4年4月から令和5年3月と、令和5年4月から令和6年3月までの1年ずつの実効線量、水晶体等価線量、皮膚等価線量の情報を取得した。

放射線診療に従事する放射線科、肝臓・膵臓・胆道内科、循環器内科、整形外科計24名に対し、職業被ばくに関するアンケート調査を実施した。質問内容として下記の4項目について自由記載方式で回答を収集した。

質問1. 透視業務に係る医師の被ばく低減に対する意識・関心を高めるにはどのような情報が必要ですか？

質問2. 被ばく対策の情報を提供・周知するアプローチとしてどのようなものが有効ですか？（診療の現場、院内講習、学会、厚生労働省（労働基準局））

質問3. 何か被ばく低減対策の良い事例を伺われたことはありますか？

質問4. 近年、透視手技中の被ばくをリアルタイムに画面表示する無線式線量計も市販されています。手技中に自身の被ばくを知ること、被ばくに対する意識を高められますか？

令和4、5年に作成したアクションチェックリストに対して、放射線診療従事者に対して実施したアンケート結果を踏まえアクションチェックリストの改善を実施した。

B-4 IT技術を活用した医療職への効果的・効率的な教育の提供に関する調査

文献検索を基に、近年企業の社員教育や教育現場で取入れられている情報を収集した。その中で、ジャストインタイム・トレーニング（Just In Time : JIT）、マイクロラーニング（Micro-Learning : ML）、アダプティブラーニング（Adaptive Learning : AL）というキーワードが注目されている教育手法として浮かび上がってきた。これらの教育手法についてその概要や医療従事者への適応について検討した。

B-4 IT 技術を活用した医療職への効果的・効率的な教育の提供に関する調査

文献検索を基に、近年企業の社員教育や教育現場で取入れられている情報を収集した。その中で、ジャストインタイム・トレーニング（Just In Time : JIT）、マイクロラーニング（Micro-Learning : ML）、アダプティブラーニング（Adaptive Learning : AL）というキーワードが注目されている教育手法として浮かび上がってきた。これらの教育手法についてその概要や医療従事者への適応について検討した。

（倫理面への配慮）

本研究は開発した教材を放射線診療従事者が使用した前後での被ばく量の変化を調査することの有効性を評価することから、九州大学病院臨床試験倫理審査委員会の承認を得た上で実施した。

C. 結果

C-1. 放射線防護教育 web サイトの構築

作成した Web サイトは資料として本報告書に参考資料として示す。Web サイトは令和 4 年 12 月 27 日に公開した。

C-2 放射線防護教育 web サイトに関するアンケート

アンケートへの職種別の回答数として、医師 45 名、看護師 24 名、診療放射線技師 81 名の計 150 名である。

アクションチェックリスト項目との診療科別の yes の回答を以下に示す。

表 1 アクションチェックリスト 診療前の準備の項目

診療前の準備
1 放射線防護エプロンを着用している
2 放射線防護メガネを着用している
3 ネックガードを着用している
4 体幹部(胸部または腹部)に線量計をつけている
5 (防護エプロンを着用する場合)体幹部の線量計をエプロンの内部に着用する
6 (防護エプロンを着用する場合)頸部の防護具の外側に線量計をつけている
7 (指先が照射野に近い場所で作業する場合)指輪型の線量計をつけている
8 電子式線量計をつけている

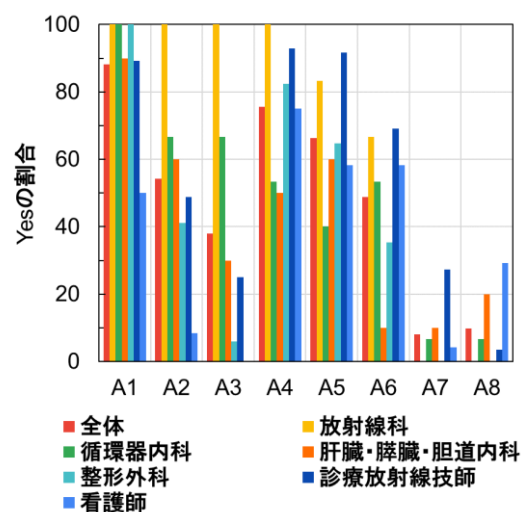


図 1 職種、診療科別アクションチェックリスト 診療前の準備 Yes の割合

表 2 アクションチェックリスト 診療中の項目

診療中の防護
9 天吊りの放射線防護板を使用している
10 天吊り防護板を術者に近づけ患者と隙間のないよう配置する
11 放射線防護衝立を使用している
12 その他の放射線防護具を使用する
13 RI線源に接近する時間を最小限にする
14 透視画面を見ない際はX線を出さない
15 総透視時間を意識している
16 X線管にできるだけ近づかない
17 患者からの散乱線の広がりを意識し、できるだけ近づかない
18 可能な範囲で照射野を絞っている
19 患者と画像検出器をできるだけ近づける
20 透視のパルスレートを可能な範囲で小さくする
21 撮影枚数を可能な範囲で少なくしている
22 照射野に手を入れない

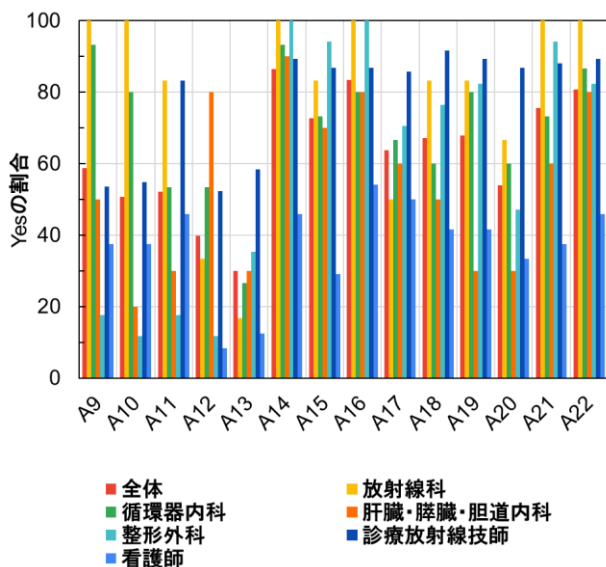


図2 職種、診療科別アクションチェックリスト
診療中 Yes の割合

表3 アクションチェックリスト 放射線影響
の理解の項目

	放射線影響の理解
23	自身の毎月の被ばく量を把握している
24	法令で定められた線量限度を知っている
25	水晶体被ばくによる白内障のリスクがあることを知っている
26	被ばくによる発がんリスクがあることを知っている
27	被ばくによる皮膚障害リスクがあることを知っている

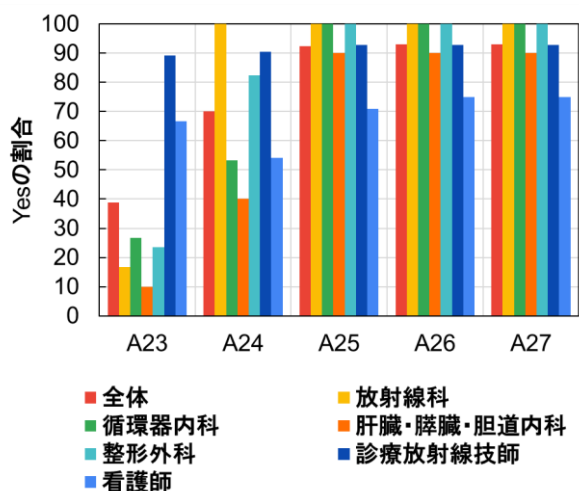


図3 職種、診療科別アクションチェックリスト

放射線影響の理解 Yes の割合

次に Q6 以降の回答を以下に示す。

Q6 アクションチェックリストと各項目の解説資料内容は理解できたか？

「はい」との回答 93.0%、「いいえ」が 2.6%、無回答が 4.6%だった。

診療科別の「はい」の回答率を図4に示す。

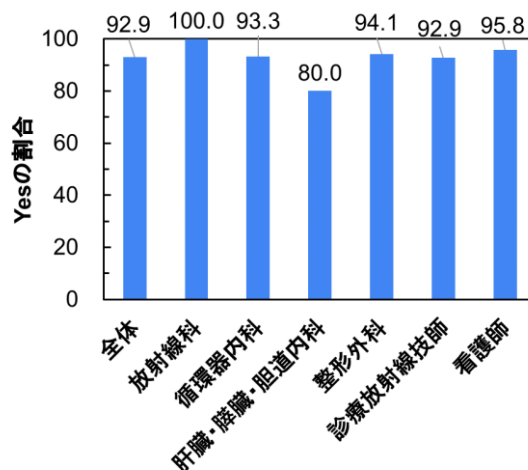


図4 職種別診療科別 アクションチェックリストと各項目の解説資料内容は理解 Yes の割合

Q7 上の質問で「いいえ」の場合、わかりづらい項目や不明な内容

- ・ 画像検出器の説明があった方がより正確な回答が得られる（線源と間違えるかも）
- ・ 照射条件は、看護師の立場では判断できない
- ・ どのモダリティとして回答して良いかわからず、CTの立場として回答すると常に放射線防護は行なっていないような回答をしなくてはならず、選択に困った。
- ・ 調査対象の状況が分からない。（ポータブル撮影のみ、OP室かなど）
- ・ パルスレートを小さくしても被ばくが減るとは限らない

Q8 今回の放射線防護のためのアクションチェックリストに加えたほうが良い、または除いたほうが良いと思うこと

- ・ モダリティにより放射線防護具や防護対策が異なるため、モダリティ別にアクションチェックリストを作成すべきである（9件）

- ・ 照射条件で、管電圧、管電流その他の項目を追加したほうが良い。
- ・ 照射野に手が入る場合に防護手袋を着用する。
- ・ 放射線防護 3 原則は理解できるが、患者にできるだけ近づかないように気をつけているという設問は医療従事者からすると避けられない部分である。一般の方や患者家族の方々の場合の設問では加えてもよい。

Q9 アクションチェックリスト以外に行っている被ばく低減対策

- ・ DRL の活用
- ・ グリッドを外す、付加フィルタや SID を変更する
- ・ 被ばく低減アルゴリズムを使用する。ノイズ低減処理の入った画像処理を実施する
- ・ 検査の介助につく看護師は必要時以外は室外で待機する
- ・ PET 患者の遠隔案内
- ・ 骨シンチ投与後の超音波検査時に、骨盤上に鉛を置いて検査していたことがあった
- ・ 患者さんへの協力をお願い
- ・ 医師との円滑なコミュニケーション

Q10 放射線業務について、身体的影響の不安があるか

「はい」との回答 50.9%だった。診療科別の結果を図 5 に示す。

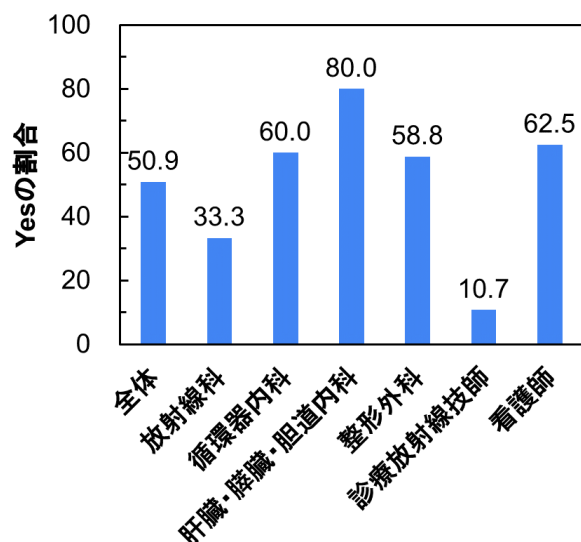


図 5 職種別診療科別 被ばくに対する不安
(被ばく対策教育の内容)

Yes の割合

Q11 上の質問で「はい」の場合、何に不安あるか

職種別、診療科別の不安の要因について図 6 に示す。

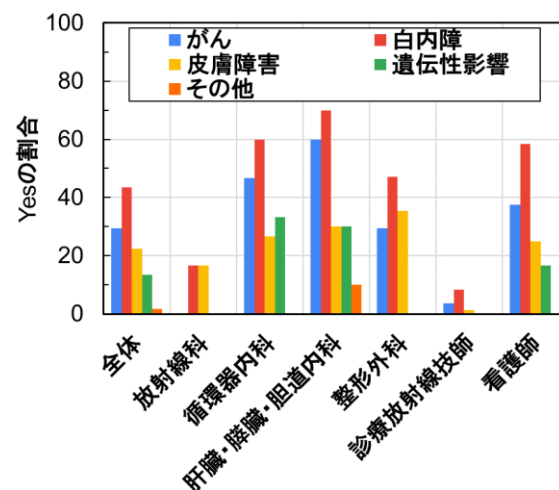


図 6 職種別診療科別 被ばくに対する不安の要因

Q12 被ばく対策について、不安なことや知りたいこと、その他自由記載

(正しい防護方法)

- ・ 知識が乏しいまま規定の防護をしているだけなので、正しく行えているかわからない。
- ・ 照射時間が長い検査の介助をするときに患者の近くにやむなく介助として付く場合、不安になることがある。
- ・ 透視下で X 線管付近での被ばくの少ないところを知りたい。
- ・ 従事しているとどうしても被ばくありと判定される月がある。ただ、具体的にどのような作業内容が該当するのかよく分からない場合も少なくない。この原因が分かれば日ごろの業務において職業被ばくを低減できる可能性はある。

(被ばく対策教育の時期)

- ・ 放射線業務に携わるようになったとき (3 名)。学習しても実際に放射線部に関わる部署でなければ忘れてしまう。
- ・ E ラーニングや自己学習で学べる教材があるとよい。

- ・ 基礎教育からしっかり学ぶ機会があるとよい。
- ・ 放射線に関わることによるリスク、被ばくによる体の影響

・

アンケートの結果、医療従事者への効果的な放射線防護教育教材として、多忙な業務の中で、職業被ばく低減のため放射線防護について基本的で効率よく効果的な学習の機会の提供（web サイトやEラーニング）が望まれていることが分かった。また放射線診療は様々な部門で扱われており、装置や場の状況に応じた適切な防護対策の教材が求められ、アクションチェックリストは検査種類別に作成する必要があることが明らかになった。この結果を受け、部門別に調整したアクションチェックリストを作成した。

放射線看護専門看護師へのインタビューの結果を以下に示す。

（教材の提示方法について）

1. 紙媒体
 - ・ 紙媒体が検査室等に置いてあると、すぐに手に取ることが出来て良い。
2. Web 教材
 - ・ Web 教材は、出来るだけ文字を減らした方が見やすい。
3. AR 教材
 - ・ C アーム等装置の状況に応じた散乱線の画像がリアルタイムに表示されると良い。透視モニタの横に示せると良い。
 - ・ 教育、トレーニングの場で AR 教材が使えると良い。臨床の場で患者が映ると個人情報、倫理上の問題がある。教育において振り返り学習が重要である。

（臨床現場での教育）

- ・ ナーシングスキル（看護師向け E ラーニングツール）のみでは理解が深められない。新人教育を 1 か月、後は飛び飛びの被ばく教育で、メインは OJT となっている。
- ・ 現場では業務がルーチンとなっている。間違ったことも気づかず実施している可能性もある。患者第一となり、自身の被ばく防護が後回しにされる。
- ・ 教育は教材、資料等利用できるが、現場に入ると一人なので、シミュレーション教育が求められる。

- ・ 防護の正しい方法
- ・ 個人線量計の正しい装着位置や、どこから放射線が出ていて散乱線などのことも含め被ばくしやすい場所を教えてください。

- ・ 業務中にどうすればよいか、具体的な動作についての対策、実体験が学びになり行動変容につながる。
- ・ IVR において、手技中に患者が手や体を動かすことがあり、透視中でも体を押さええないといけない。危険な位置に近づくと視覚・聴覚・触覚に訴えたアラーム等で知らせてくれる機能があると良い。

（加えるべき内容について）

- ・ 核医学治療で α 核種が使用され始めているが、患者の一般病棟への移動基準が施設により異なっている。今後適用腫瘍の拡大により使用量も増えることが予測され、適切な管理方法の周知と普及が求められる。
 - ・ 核種による管理、防護方法の違いを知りたい。
- （現場での課題について）
- ・ 看護管理者にも放射線防護の必要性を十分理解していただく必要がある。看護師の放射線防護物品の配給、整備に関わる。
 - ・ 教育、研修の実施に非学会員はしきいが高い。看護師ラダーに放射線防護は含まれていない。多職種連携の中で話をしている状況。

C-3 放射線防護教材の有効性の検証

放射線防護教材前後の対象者の年間実効線量、水晶体等価線量、皮膚等価線量を表 1 および図 1 に示す。使用前は令和 4 年 4 月から令和 5 年 3 月、使用後は令和 5 年 4 月から令和 6 年 3 月である。

表 1 放射線防護教材使用前後の実効線量、水晶体等価線量、皮膚等価線量

	使用前			使用后		
	実効線量	水晶体線量	皮膚線量	実効線量	水晶体線量	皮膚線量
全体	0.49	1.41	1.47	0.37	0.94	1.02
肝臓・膵臓・胆道	0.03	0.03	0.03	0.05	0.05	0.03
循環器	1.46	3.81	4.12	0.69	1.38	1.84
放射線科	0.72	4.14	4.00	1.25	5.58	5.50
放射線部	0.23	0.48	0.48	0.25	0.48	0.51

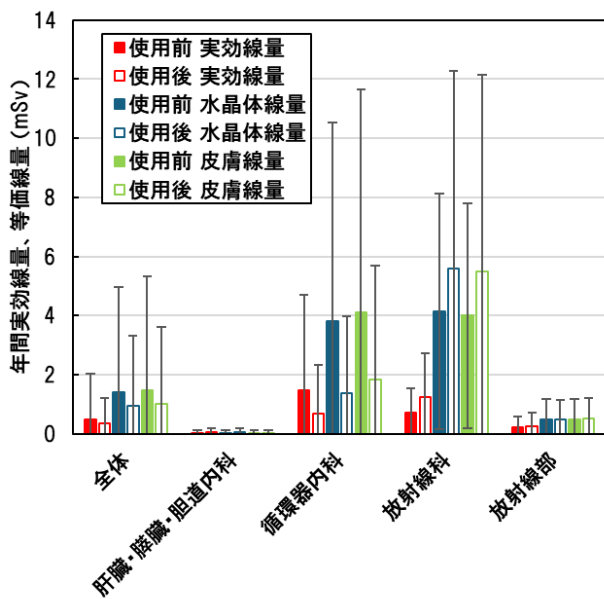


図 1 放射線防護教材使用前後の実効線量、水晶体等価線量、皮膚等価線量

放射線防護教材使用前後の個々の対象者の実効線量、水晶体等価線量、皮膚等価線量の変化を図 2 から 4 に示す。多くの対象者は減少もしくは同等の傾向がみられる。

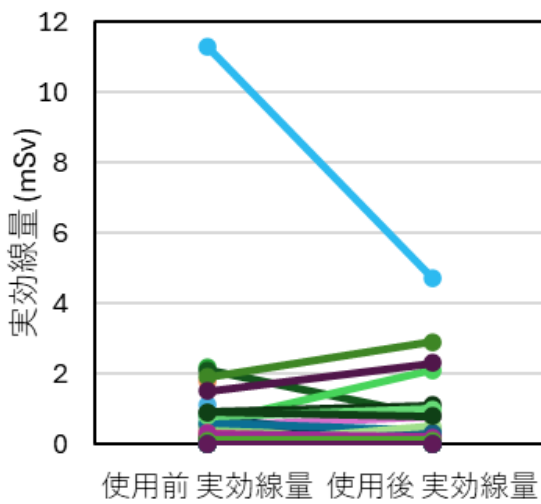


図 2 放射線防護教材使用前後の個々の対象者の実効線量の変化

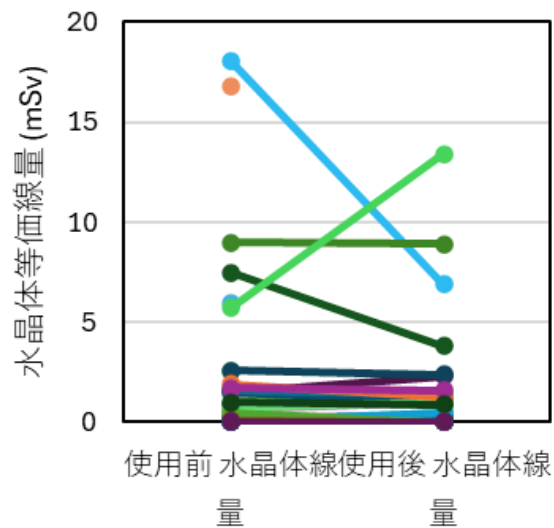


図 3 放射線防護教材使用前後の個々の対象者の実効線量の変化

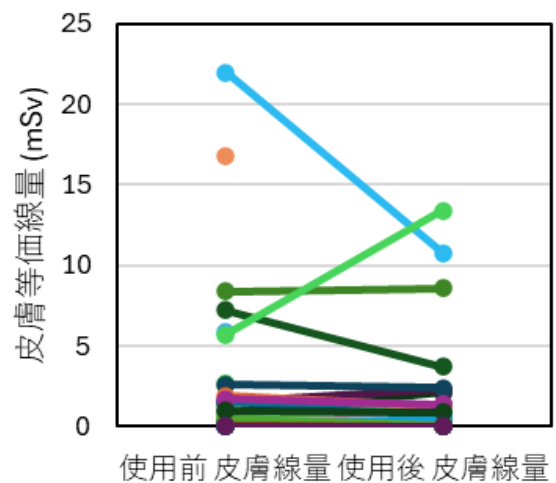


図 4 放射線防護教材使用前後の個々の対象者の実効線量の変化

放射線防護教材使用前後の実効線量および等価線量の頻度の分布を図 5 に示す。対象者の 6 割近くが被ばく無しで、年間 1 mSv を超える対象者は 1 割程度であった。

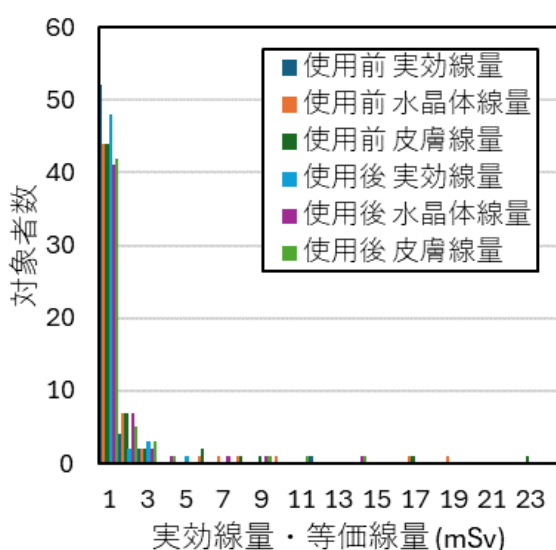


図 5 放射線防護教材使用前後の実効線量および等価線量の頻度の分布

放射線を使用する各診療科医師への職業被ばくに関するアンケートについて、各質問に対する回答を示す。

質問 1. 透視業務に係る医師の被ばく低減に対する意識・関心を高めるにはどのような情報が有効ですか？

(内容について)

- ・ 被ばくによる影響と具体的な事例 (11 名)
- ・ 現場での被ばくによる影響 (確率的影響のリスク、組織反応) と事例の周知。
- ・ 被ばくの影響などはすでにかなり周知されていると思います。
- ・ 他施設の良い対策例 (4 名)
- ・ リアルタイムに被曝量を認識できる状況 (数字や視覚的に) (4 名)
- ・ 10 年前と比較して現在は最小限の被ばくに抑えていると思うが、それでもある一定以上の被ばくが生じるのは医療を行う上でやむをえないのかもしれない。
- ・ 増え続ける医療費の議論にも似るが、医療者あたりの患者自体の数を減らせない限りは医療者の身体がある程度の被ばくの犠牲になるのはやむをえない。

質問 2. 被ばく対策の情報を提供・周知するアプローチとしてどのようなものが有効です

か？ (診療の現場、院内講習、学会、厚生労働省 (労働基準局))

(時期について)

- ・ 年度はじめに周知すること。
- ・ 入職時に提供。
- ・ 診療科のカンファレンスや透視処置の前後。
- ・ 業務従事当初に周知すること。
- ・ 消化器内科で言えば、卒後 3 年目以降 (消化器内科 1 年目) で、透視下処置 (ERCP やイレウスチューブなど) に従事し始めるため、専門家としての意識づけとしても、早いタイミングが良い。

(開催方式)

- ・ 診療の現場 (12 名)
 - ✓ 小グループがよい
 - ✓ 手技をする場所 (手術室や透視室) に被ばく低減策を示したポスターを掲示。
 - ✓ 術者と助手でどれくらい被ばく量に差があるか、それぞれ 1 年でどれくらい被ばく量が蓄積されるかなど知りたい。
 - ✓ 個人での対策は限界があるので、他の処置などと同じように科全体として上級医から指導を受けるのが良い。
 - ✓ 被ばく対策を体験するようなワークショップ。
- ・ 院内講習 (12 名) E-learning (3 名)
- ・ 学会 (3 名)
 - ✓ 学会や論文などでの発表が良い。
 - ✓ 学会に合わせて、各々の透視業務で被ばくが高い動作や位置などを個々の事例の情報があると有用

質問 3. 何か被ばく低減対策の良い事例を伺われたことはありますか？

- ・ 特になし (9 名)
- ・ 組織的な対応は学会などで聞いたことがある (2 名)
- ・ 論文を拝見した記憶があるが、詳細は覚えていない。
- ・ 放射線防護具の活用 (手袋、眼鏡、防護衣) (6 名)
- ・ ERCP 領域では透視線源自体を覆うことでかなり被ばくを抑えられ、さらに遮蔽板を置く、不必要には透視室へ入らないなど対策 (2 名)
- ・ ロボット PCI、アンギオ装置の改良、画像検出器の高感度化

- ・ 診療放射線技師からのアドバイスをもらったことはある。
- ・ 先輩医師の体験談

質問 4. 近年、透視手技中の被ばくをリアルタイムに画面表示する無線式線量計も市販されています。手技中に自身の被ばくを知ること、被ばくに対する意識を高められますか？

- ・ 有効と思われる (20 名)
- ・ 被ばくを低減しようと意識する機会が高まると思います。
- ・ 有用だが、手技への集中を邪魔しない工夫が必要。
- ・ 少なくとも意識は高まるが、実際に被ばくが減るかは別問題かも。
- ・ 被ばく量だけでは意識は変わらない (被曝量がある一定量に達しても手技を止められない)。(2 名)
- ・ それより、遮蔽板の各部屋への購入 (1 枚以上あってもいいと思います) やプロテクタを全面保護 (前面だけの保護でない) に当てた方が、実際に被曝量を抑えられる。

令和 5, 6 年度の放射線診療従事者へのアンケートの結果から、放射線防護具の正しい使用方法を知りたい声が複数あった。そのため、教材には十分放射線防護具が配備されているか、使用しているかを分けてアクションチェックリストに詳細に記載した。自身の被ばく量の把握を十分に理解できていないとの意見もあり、アクションチェックリストに着用する可能性のある個人線量計の種類を追加した。また、診療の現場の散乱線分布の理解の促進の要望に対して、具体的な散乱線分布の詳細は web サイトや 3 次元放射線可視化教材で紹介する教材を追加した。

アクションチェックリストは、令和 4 年度版は 27 項目であったが、令和 5 年度版は 40 項目 6 部門 (一般撮影、透視、血管造影、CT、核医学、放射線治療) に、令和 6 年度版は防護具や線量計の種類等具体的に 80 項目、7 部門 (小線源治療追加) に追加した。アクションチェックリストを本資料の補足資料として章末に添付する。

C-4 IT 技術を活用した医療職への効果的・効率的な教育の提供に関する調査

- ・ ジャストインタイム・トレーニング

限られた時間で効果的な人材育成を行う方略として、企業などではジャストインタイム・トレーニング (JIT) がある。JIT とは、従業員が必要な時に必

要な知識やスキルを習得できる学習戦略であり、不必要な事前トレーニングを最小限に抑え、実務での応用を最大限に高めるものである。必要な時に必要な学習をする (適時性)、現在関与している課題に関して学習を行う (関連性)、必要な知識だけに絞り、不必要なトレーニングは最小限にする (効率性)、個々の学習のレディネスや経験、パーソナリティに合わせた学習やオンデマンドのコースなどを行う (柔軟性) を内包する。医療分野での JIT についてもこれまでいくつかの研究があるが、患者の安全を維持し、医療の進歩に遅れずについていくために有益といえる。周術期の看護師は、JIT トレーニングによってスキルを最新のものに更新し、時間とリソースが限られているという課題に対処することが可能となるこのようなアプローチにより、医療職は質の高い医療実践を提供する能力を損なうことなく、必要な知識にアクセスできる。

- ・ マイクロラーニング

個人に合わせるとともに少ない時間で学習機会を提供する方法として、マイクロラーニング (Micro-Learning : ML) やアダプティブラーニング (Adaptive Learning : AL) の概念が、親和性が高いといえる。ML とは、短い教材からなる教育プログラムを指し、1 章の教育が細かく一口サイズのレッスンに分割され、多様な形式 (ゲーム、ビデオ、クイズなど) を含み、学習者に即座にフィードバックすることができる。ML は 1950 年代: スキナーのプログラム学習が、マイクロラーニングの原型と言われ、1990 年代に入り、e ラーニングの普及とともに、ML の概念が生み出された。初期の e ラーニングは、長時間の講義ビデオやテキストベースの教材が中心であったが、学習者の集中力維持や学習時間の確保が課題だった。そこで、学習内容を細分化し、短時間で学習できる ML が登場した。2000 年代に入り、携帯端末の普及により、モバイルラーニングとマイクロラーニングが融合し、場所や時間にとらわれない学習が可能になってきた¹²⁾。さらに 2010 年代以降は動画共有プラットフォームや SNS の普及により、マイクロラーニングコンテンツの制作・共有が容易になり、企業研修、学校教育、医学領域でも導入が進んできた¹³⁾¹⁴⁾。ML の利点は、各モジュールで 1 つの問題・課題に対して答えを出していくため、何が大事であるのか容易に理解でき効率の良い学びができる点にある。

- ・ アダプティブラーニング

一方、アダプティブラーニングは、AI や学習データを活用し、学習者一人ひとりの進捗や理解度に合わせて最適な教材や指導を提供する教育手法である。アダプティブラーニングシステムは、学習者の解答履歴や理解度を分析し、次に提示する問題や教材を

自動的に調整できる。そのため、AIは、学習者の得意分野を伸ばし、苦手分野を克服するための個別最適化された学習プランを提供できる。AIは、EdTech（教育テクノロジー）分野で注目されており、教育機関や企業での導入が進んでいる。学習者の回答結果に合わせ動画やクイズ、様々なコンテンツを提供するためには、昨今目まぐるしく発展している生成AIを活用し、回答に応じた学習者の特徴に沿ったものを提供できるシステムが提供され始めている。生成AIとは、人間のような理解と創造性を模倣した新しいコンテンツ（テキスト、画像、あるいは複雑なシミュレーション）を生成できる人工知能技術のサブセットである¹⁶⁾。あらかじめ定義されたアルゴリズムと設定されたパターンで動作する従来のAIとは異なり、生成AIは大規模言語モデル(LLM)として知られるものを使用してコンテンツを処理し生成する¹⁷⁾。OpenAIによって開発されたChatGPT(Generative Pre-trained Transformer)を含むこれらのモデルは、人間が生成したテキストの広範なデータセットで訓練され、文脈に関連した、驚くほど首尾一貫した言語を理解し、生成する。これらの新しい生成AIモデルは、出力を生成する前にテキストのすべての部分を計量する変換器アーキテクチャに依存している。これにより、より長い会話や文書でも文脈を維持できるようになり、以前のモデルから大きく飛躍した¹⁹⁾。データ学習は時間差が生じており、最新の情報を有していないことや、AIによる推論から事実ではないハルシネーションが発生することもあり、正確性を伴う必要がある場合には注意が必要である。しかしこれらもAIへの指示を行うプロンプトの作成スキル、判断基準などを学習させるグラウンディング、確実にその情報だけを繋げるRAGなどの技術により、より精度の高いAIアシスト型のAIがノーコードでも開発可能とされてきている。

D. 考察

本サイトでは多くの画像や動画を貼り付けることで、放射線に対する専門教育を受けていない医療従事者にも理解しやすいよう作成したが、専門用語の説明が不足していることから、それらの補足説明を追加する必要がある。また動画では映像が流れるだけであり、より理解度を上げるために音声や字幕等で今後補足をする。アクションチェックリストについては部門別に対策が異なることから、部門別のリストを作成し、サイトで確認できるように改修する必要がある。

アンケートの結果、Yesの回答率の低いものを重点的に対策する必要があるが、部署によっては、元々所持していない、必要のない防護具の情報も含まれている。そのため100%になる事を求める

わけではない。照射条件など、職種によっては直接関係のない情報も含まれている。

診療放射線技師は他の職種に比べYesの回答率が有意に高かった。アンケート結果を踏まえての放射線防護教育教材の開発として、下記のことを今後の課題であり検討する。

「好きな時間に自己学習できる教材が欲しい」という意見に対して、→ Webサイト、Eラーニングの活用、モバイルラーニング(スマホアプリ)を作成する。

「職種や個人による知識の差、部署による防護方法の違い」の課題について、AIを活用した個別化学習の取入れを図る。

「放射線の危険な場所、正しい防護方法、放射線の影響について知りたい」という意見に対して、コンテンツの充実（動画、インタラクティブな教材）、VR/ARによる放射線の可視化、活用と普及、ゲーム性を持たせる、半導体検出器による散乱線の可視化を含めた教材の開発を進める。

放射線防護教材の有効性の調査結果から明らかになったこととして、全体の平均線量は使用後で70%程度低下したが、統計的有意差は認められなかった。高被ばく者について、2年間での大きな違いはなく、放射線診療に従事する業務量の問題が大きく聞いている可能性がある。また放射線防護対策が不足しているかは本調査からは不明であり、高被ばくとなることの原因究明には、直接的な介入が必要である。

放射線防護教材の有効性の評価を実施する上で考えられる課題を下記に挙げる。対象者について、今回多くの対象者は2mSv未満の被ばく(6割近くは0)で、変化が確認しづらかった。これは、放射線防護教材を使用する前から十分な対策が出来ている可能性があり、調査する際の施設のバックグラウンドにより教材の効果が異なることを示唆する。

教材の運用方法について、教材やアクションチェックリストを作成するだけでなく、これらをいっつどのように使用するかが、効果な活用に重要である。また放射線診療を実施する場も幅広く、モダリティや職種により放射線防護方法が大きく異なる。そのため、基礎的な項目として一般的な放射線防護方法の説明をする教材も必要ではあるが、現場の状況に応じた放射線防護対策の教材作成が求められる。これは厳密にはモダリティ別に作成するだけでなく、個々の医療機関によっても備えられている放射線防護具や部屋の大きさ、機種、業務量や担当する職種などが異なり、細かな状況に応じた放射線防護教育の最適化ができ

ればよいが、現状では放射線防護教材や E-learning では一般的なことしか示すことが出来ず、一方通行の説明となり、ここが大きな限界となっている。そのため教材作成だけでなく、対象者とのコミュニケーションを取りやすい環境を構築することが細かな放射線防護対策には重要となる。

また放射線防護教材の有効性について、今回は教材の使用前後での被ばく量の比較から評価をしたが、他の放射線教育、講習の機会により被ばく低減効果があっても判別が出来ない。これは今回の有効性の評価法のデザインでの問題点である。2021 年の電離放射線障害防止規則等での水晶体等価線量限度の引き下げに伴い、労働基準局からの案内の他、関係学会等でも特集の記事を組んだり学会シンポジウムとして企画したりするなど放射線診療従事者の自分自身の被ばくに対する関心が高まっている。これらの他の放射線防護意識の向上に対するバイアスは排除できず、被ばく量だけからでは教材の真の有効性を図ることに限界があった。

各診療科の医師に対するアンケートからは、職業被ばくに対する意識や関心が高まっていることが確認できた。中でも被ばくによる影響の具体的な事例を知りたいという要望が多く、医療現場での事例の周知が望まれている。医療現場での職業被ばくによる放射線影響の事例を紹介することは、自身の被ばくを他人事とすることなく、対策をした上で放射線を扱わないと自分が被害を受ける可能性があることとして主体的に防護対策に取り組む契機となる可能性がある。また他施設の良い防護対策の事例を紹介しあうことは、自施設で実施できるかどうかは別として参考知識として活用でき、対策例を広く集め自由に閲覧できるような環境、設備を構築することが有効であると考えられる。

放射線診療を実施する上で患者の医療安全を優先しつつ、自分自身の労働衛生環境も適切なものとすることは身体的、精神的にも負担のかかることであるが、多くの医療従事者やデジタル技術によってサポートしながら、患者や医療従事者にとってより安全な放射線診療の場を構築することが求められる。

我々の今いる世界は情報にあふれており、どの情報を受け取るのか個人がそれぞれの立場で情報を選択していく。できるだけ短くわかりやすい情報を好み、全般的に人の注意力は年々低下し、デジタル化のライフスタイルが長時間の集中を妨げている²⁰⁾。それ故、医療人材については、JIT を実施し、効率的かつ適切な教育を行い、またこうした人材育成につ

いては正確性、関連性のある教育に対して適時性を考慮して行えるように整備していくことが求められる。放射線に関する教育もその専門性のレベルにより提供の仕方も AI によって調整は可能となるが、系統的な教育ではなく、個別のレディネスと経験によって提供内容を変更する方向に進んでいくと考えられる。

E. 結論

本研究において、放射線診療中従事者の被ばく量から放射線防護教材の有効性を検証した。平均被ばく量は資料使用後に低下したが、統計的有意差は確認できなかった。放射線診療を実施する医師へのアンケート調査からは、放射線業務での放射線影響や対策に関する事例の情報の共有が望まれていること、様々な放射線診療の現場に応じた防護対策とそのサポートが望まれる。

医療人材の育成において、JIT、ML、AL の活用は有効であり、特に AI の進化に伴いさらに高度な学習環境が整えられる。今後、医療放射線防護教育などの専門教育にも適用され、個々の学習ニーズに応じた調整が進むと考えられる。

F. 健康危険情報

なし

G. 研究発表

1. 論文発表

12. 藤淵 俊王, 水晶体被ばくに関わる近年の動向, 日本放射線技術学会 放射線防護部会誌, 24, 14-31, 2024
13. 藤淵 俊王, 水晶体被ばくに関わる近年の動向, インナービジョン, 40, 22-23, 2025.

2. 学会発表

- 1: 厚生労働省労災疾病臨床研究の取り組み、放射線安全フォーラム 第79回放射線防護研究会 2023. 6. 17
2. 藤淵俊王、岡崎龍史、富澤登志子、医療従事者の職業被ばく低減を目的とした放射線防護教育webサイトの構築、第9回福岡線診療放射線技師会学術大会 2023.6.24
3. 藤淵 俊王、XRの医療放射線分野への活用、日本医学物理学会 市民公開講座 講演3、2024.8.16
4. 藤淵 俊王、水晶体被ばくに係る近年の動向、第1回日本放射線医療技術学術大会 2024.11.1
5. 藤淵 俊王、医療従事者の職業被ばくと放射線防護教育 日本医学物理士会 2024年度ベーシ

ックセミナー④「放射線安全教育」2024.12.6

6. Donghee Han, Toshioh Fujibuchi, An evaluation of human phantom applicability of 3D-printed filaments by dose measurement of Monte Carlo simulations and radiophotoluminescence glass dosimeters, The 24th Asia-Oceania Congress of Medical Physics (AOCMP 2024), Penang, October 10-13, 2024.

(予定を含む。)

1. 特許取得
なし
2. 実用新案登録
なし
3. その他
なし

H. 知的財産権の出願・登録状況

(資料) 令和 6 年度に改良したモダリティ別アクションチェックリスト

各部署別の対象装置を以下に示す。

一般撮影：一般撮影装置、ポータブル撮影装置、歯科撮影装置

X 線透視：透視装置、小線源用透視装置

血管造影：血管造影装置

CT 検査：診断用 X 線 CT 装置、治療計画用 CT、PET-CT、SPECT-CT

核医学診療：非密封放射性同位元素

外部放射線治療：高エネルギー放射線発生装置

小線源治療：密封放射性同位元素

A:放射線診療従事者、M：放射線管理者

職業被ばく低減対策アクションチェックリスト
(令和 6 年版)

診療前の準備、関連機器・器具の配備					一般撮影	X 線透視	血管造影	CT 検査	核医学診療	外部放射線治療	小線源治療
放射線防護具(個人着用型)の配備	1	放射線防護衣(エプロンタイプ)を配備	Yes	No	A	A	A	A	A		A
	2	放射線防護衣(コートタイプ)を配備	Yes	No	A	A	A	A	A		A
	3	放射線防護衣(ベストタイプ)を配備	Yes	No	A	A	A	A	A		A
	4	放射線防護衣(スカートタイプ)を配備	Yes	No	A	A	A	A	A		A
	5	防護衣着用時の肩や腰の負担軽減用ベルトやサポーターを配備	Yes	No	A	A	A	A	A		A
	6	放射線防護用ゴーグルを配備	Yes	No	A	A	A	A	A		A
	7	放射線防護用甲状腺防護具を配備	Yes	No	A	A	A	A			A
	8	放射線防護用手袋を配備	Yes	No	A	A	A	A			A
	9	放射線防護用帽子を配備	Yes	No	A	A	A	A			A
放射線防護具(非着用型)の配備	10	放射線防護板(天吊り、移動式)を配備	Yes	No		A	A	A	A		A
	11	放射線防護衝立(移動式)を配備	Yes	No	A	A	A	A	A		A
	12	放射線防護カーテンを配備	Yes	No		A	A	A			
	13	放射線防護ドレープを配備	Yes	No		A	A	A			A

個人線量計の 配備	14	体幹部(胸部または腹部) 用個人線量計の配布	Yes	No	A	A	A	A	A	A	A
	15	(防護衣を着用する場合) 頸部用個人線量計の配布	Yes	No	A	A	A	A	A		A
	16	(指先が照射野に近い場 所で作業する場合) 指輪型の個人線量計の配 布	Yes	No	A	A	A	A	A		A
	17	水晶体線量測定用線量計 の配布	Yes	No	A	A	A	A	A		A
	18	(外部放射線治療、PET サイクロترون担当の場 合) 中性子線測定用の個人線 量計の配布	Yes	No						A	
	19	電子式個人線量計を配備	Yes	No	A	A	A	A	A	A	A
サーベ イメー タ	20	(汚染検出用)GM サーベ イメータを配備	Yes	No					M		M
	21	(空間線量測定用)サーベ イメータを配備	Yes	No	M	M	M	M	M	M	M
	22	エリアモニタを設置	Yes	No					M		M
補助具 の配備	23	患者、患児用の固定具を 配備	Yes	No	A	A	A	A	A	A	A
	24	照射野、線源への近接を 防ぐ鉗子等補助具を配備	Yes	No	A	A	A	A	A	A	A
核医学 用関連 機器	25	RI 投与時の自動投与装 置を配備	Yes	No					A		
	26	手動による投与時、シリン ジシールドを配備	Yes	No					A		
	27	β 線源等、線種に適した遮 蔽体を配備	Yes	No					A		
装置の 品質管 理	28	放射線装置の始業点検、 品質管理を実施	Yes	No	M	M	M	M	M	M	M
	29	放射線装置の照射条件の 管理を実施	Yes	No	M	M	M	M	M	M	M
	30	放射線防護具の品質管理 を実施	Yes	No	M	M	M	M	M	M	M
	31	線量計の品質管理を実施	Yes	No	M	M	M	M	M	M	M
放射線 分布の 理解	32	放射線業務時の室内の放 射線分布をイメージできて いる	Yes	No	A	A	A	A	A	A	A
	33	室内の放射線分布図を掲 示	Yes	No	M	M	M	M	M	M	M

診療中の防護					一般撮影	X線透視	血管造影	CT検査	核医学診療	外部放射線治療	小線源治療
個人線量計の使用	1	体幹部(胸部または腹部)用個人線量計を着用	Yes	No	A	A	A	A	A	A	A
	2	(防護衣を着用する場合)体幹部用の個人線量計を防護衣の内側に着用	Yes	No	A	A	A	A	A		A
	3	(防護衣を着用する場合)防護衣の外側に個人線量計を着用	Yes	No	A	A	A	A	A		A
	4	(指先が照射野に近い場所で作業する場合)指輪型の個人線量計を着用	Yes	No	A	A	A	A	A		A
	5	水晶体線量測定用線量計を着用	Yes	No	A	A	A	A	A		A
	6	(外部放射線治療、PETサイクロトロン担当の場合)中性子線測定用の個人線量計を使用	Yes	No						A	
	7	電子式個人線量計を着用	Yes	No	A	A	A	A	A	A	A
放射線防護具(個人着用型)の使用	8	放射線防護衣(エプロンタイプ)を使用	Yes	No	A	A	A	A	A		A
	9	放射線防護衣(コートタイプ)を使用	Yes	No	A	A	A	A	A		A
	10	放射線防護衣(ベストタイプ)を使用	Yes	No	A	A	A	A	A		A
	11	放射線防護衣(スカートタイプ)を使用	Yes	No	A	A	A	A	A		A
	12	肩や腰の負担軽減ベルトやサポーターを使用	Yes	No	A	A	A	A	A		A
	13	放射線防護用ゴーグルを使用	Yes	No	A	A	A	A	A		A
	14	放射線防護用甲状腺防護具を使用	Yes	No	A	A	A	A	A		A
	15	放射線防護用手袋を使用	Yes	No	A	A	A	A	A		A
	16	放射線防護用帽子を使用	Yes	No	A	A	A	A	A		A
放射線防護具(非着用型)の使用	17	放射線防護板(天吊り、移動式)を使用	Yes	No		A	A	A		A	A
	18	放射線防護衝立を使用	Yes	No	A	A	A	A		A	A
	19	放射線防護カーテンを使用	Yes	No		A	A	A			

	20	放射線防護ドレープを使用	Yes	No		A	A	A			
放射線防護具 (遮蔽による防護)	21	放射線防護板の後方での作業	Yes	No	A	A	A	A	A		A
	22	放射線防護衝立の後方での作業、監視	Yes	No	A	A	A	A	A		A
	23	その他の放射線防護具を使用	Yes	No	A	A	A	A	A	A	A
	24	照射時は操作卓側出入口の扉を閉めている	Yes	No	A	A	A	A	A		A
手技中の位置 (距離による防護)	25	X線管、線源にできるだけ近づかないようにしている	Yes	No	A	A	A	A	A	A	A
	26	患者からの散乱線の広がりを意識し、可能な範囲で近づかないようにしている	Yes	No	A	A	A	A	A		A
	27	照射野に手を入れない	Yes	No	A	A	A	A			
	28	小児の固定時、固定具を使用	Yes	No	A	A	A	A	A		A
照射、画像処理条件	29	診断参考レベルを参考に、照射条件を最適化している	Yes	No	M	M	M	M			M
	30	可能な範囲で照射野を絞る	Yes	No	A	A	A	A			A
	31	患者と画像検出器をできるだけ近づける	Yes	No	A	A	A	A			A
	32	グリッドを外す、付加フィルタや線源-検出器間距離を変更する	Yes	No	A	A	A	A			
	33	撮影枚数を可能な範囲で少なくしている	Yes	No	A	A	A	A			
	34	被ばく低減(ノイズ低減)処理の入った画像処理アルゴリズムを使用	Yes	No	M	M	M	M			
	35	患者に静止の必要性について説明し、協力してもらう	Yes	No	A	A	A	A			
	36	医療スタッフ間でのコミュニケーションを取る	Yes	No	A	A	A	A			
	37	透視のフレームレートを出来るだけ下げる	Yes	No		A	A				
核医学関連	38	RI 投与時、自動投与装置を使用	Yes	No					A		
	39	手動による投与時、シリンジシールドを使用	Yes	No					A		
	40	B線源等、核種に適した遮蔽体を使用	Yes	No					A		

	41	放射性医薬品投与量の最適化	Yes	No					A		
	42	RI 調剤時はドラフト内での作業	Yes	No					A		

放射線影響の理解					一般撮影	X 線透視	血管造影	CT 検査	核医学診療	外部放射線治療	小線源治療
被ばく の リ ス ク	1	自身の毎月の被ばく量を把握している	Yes	No	A	A	A	A	A	A	A
	2	法令で定められた線量限度を知っている	Yes	No	A	A	A	A	A	A	A
	3	水晶体被ばくによる白内障のリスクがあることを知っている	Yes	No	A	A	A	A	A	A	A
	4	被ばくによる発がんリスクがあることを知っている	Yes	No	A	A	A	A	A	A	A
	5	被ばくによる皮膚障害リスクがあることを知っている	Yes	No	A	A	A	A	A	A	A

放射線防護の
重要性

職業被ばくの
線量限度と実態

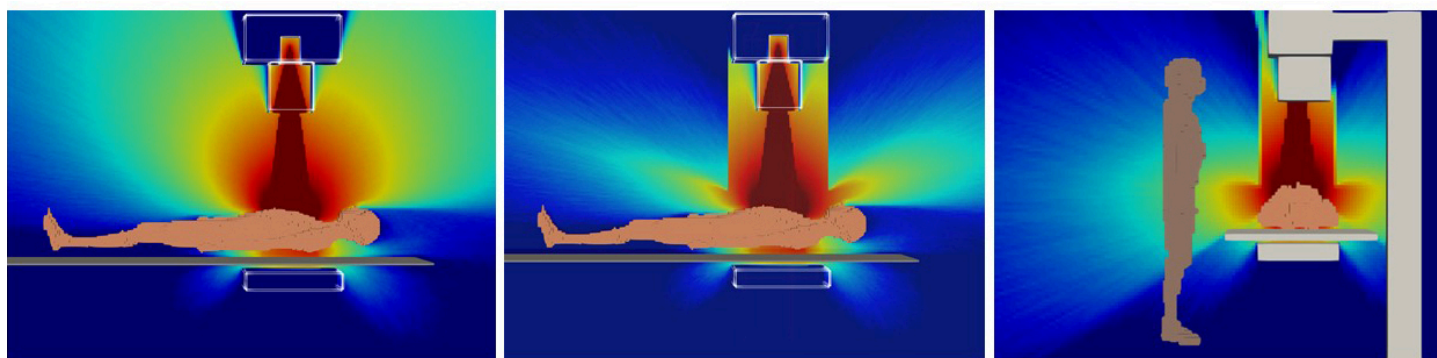
線量評価
・モニタリング

医療現場での放
射線防護の原則

部門別防護対策

アクション
チェックリスト

放射線防護教
材・関連資料



はじめに

2011年に国際放射線防護委員会で水晶体等価線量限度引下げの勧告が出て以降、国内では法令取入に向けた実態調査や被ばく低減対策の検討が進められてきました。放射線診療従事者の中でも業務内容と被ばくの関係性を調査すると、X線管に接近して操作が必要な透視下手技に携わる医師や看護師の被ばくが特に高いことが明らかになってきました。法令改正後も線量限度を超過する可能性のある放射線診療従事者が存在し、その要因として以下のことが考えられます。

- **医療現場の実務に即した放射線防護教材の不足**：放射線防護教材は多く用意されていますが、被ばくに関する概念・法令・理論に関するものがほとんどで、放射線診療従事者の実務に反映するのは困難です。多くの医療従事者がより理解しやすくするために、放射線診療従事者に対して事前に放射線被ばくの低減の重要性を説明するとともに、医療従事者の視点で様々な理解度や業務内容、さらに所持している防護具に応じた教材が求められていると考えられます。
- **放射線は五感に感じないこと**：放射線は五感に感じないことから、危険を察知しづらいです。放射線の広がりや危険な場所を可視化、可聴化することで危険を予測することが可能になると考えられます。
- **放射線防護具の適正な使用法をはじめとした放射線防護法の理解不足**：被ばく低減対策として放射線防護眼鏡や防護板の有効性が報告され活用されていますが、現場で所持しているだけでなく適切に使用しないと防護効果を発揮できません。手技によっては装置や患者と緩衝してしまうことから、全ての放射線診療で使用できるわけではありません。防護具だけでなく、照射条件や人員配置等から総合的に対策を図る必要があります。

そこで本労災疾病臨床研究では、これまでの知見とデジタルトランスフォーメーション(DX)の技術を活用して実効性の高い放射線診療従事者の被ばく低減対策教材を開発して被ばくの低減を図ることを目的とし、その成果を本ホームページにおいて紹介いたします。

Contact

〒812-8582
福岡県福岡市東区馬出3-1-1

九州大学大学院医学研究院
保健学部門医用量子線科学
分野内

デジタルトランスフォーメーションを活用した医療従事者の被ばく低減プログラムの開発と有効性の検証

TEL:
092-642-6721

E-mail:
fujibuchi.toshioh.294@
m.kyushu-u.ac.jp

学生実習用ページ

管理者専用ページ

Link

 九州大学

※デジタルトランスフォーメーション(DX)とは、デジタル技術を使って社会生活や事業の在り方を変革させることで、本研究ではデジタル技術の活用による新たな放射線防護方法や放射線防護教材を開発し、医療従事者の被ばく低減に役立てることを目的としています。

Introduction of Scatter radiation Visualization using Radiation Protection Teach...



新着情報

- 2024年07月23日 [外科手術のCアームX線装置による被ばくを減らすには?](#)
- 2023年10月20日 [Commentary No. 33 – Recommendations for Stratification of Equipment Use and Radiation Safety Training for Fluoroscopy_\(2023\).](#)
- 2023年09月21日 [日本学術会議から、見解「医療従事者の職業被ばくに係る放射線管理の改善に向けて」が公開されました](#)
- 2023年03月15日 [\[論文\] Effectiveness of staff radiation protection devices for interventional cardiology procedures](#)
- 2023年02月16日 [\[FAQ\] 放射線防護板の扱いに慣れておらず作業の邪魔になるのですが、使用する必要が](#)

医用医療機器学会
がんブ
ース
JA
へ

実践的な課題解決能力を持
つ高度放射線防護人材育成
プログラム

放射線防護の
重要性職業被ばくの
線量限度と実態線量評価
・モニタリング医療現場での放
射線防護の原則

部門別防護対策

アクション
チェックリスト放射線防護教
材・関連資料

Contents

医療従事者への放射線防護
の重要性

ヒトへの放射線影響

主な組織反応に対するし
きい線量 (ICRP103、
118等より)がんと遺伝的影響に対す
るリスク

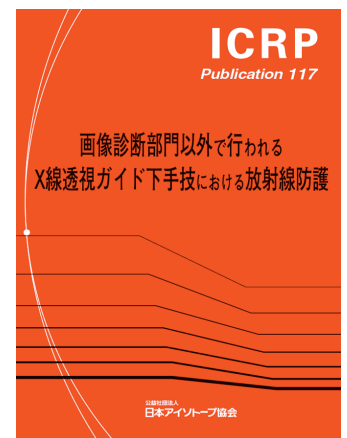
放射線の人体影響

環境省 放射線による健康
影響等に関する統一的な
基礎資料医療従事者の放射線障害の
事例医療従事者のがん発生率
コホート調査整形外科のIVR中に術者の
指が照射野に入っている
例手への直接放射線被曝と
爪甲色素線条および手荒
れとの関連: 最小侵襲脊椎
治療学会 (MIST) による
調査NHK: 放射線業務により
健康障害 (皮膚がん) が
出た医師への取材血管造影検査に係る医療
従事者の水晶体混濁心臓インターベンション
担当者の放射線白内障リ
スク

放射線防護の重要性

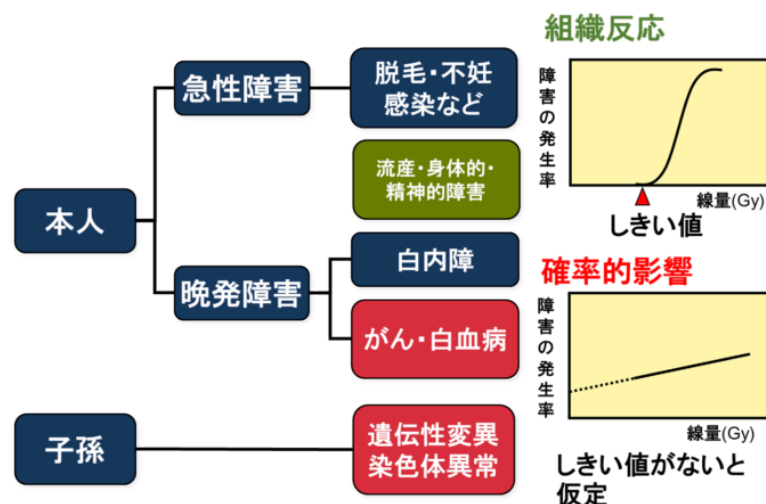
医療従事者への放射線防護の重要性

- 放射線診療は増加しており、医療従事者の被ばくを伴う処置も頻繁に実施されている。
- 放射線科、循環器内科に加え、脳神経外科、整形外科、泌尿器科、消化器外科等の医師はX線透視で放射線障害の可能性がある。
- 水晶体混濁が報告され、眼の放射線防護を強化する必要性への関心が高まっている。
- 国際放射線防護委員会 (ICRP) の勧告では、手術室でX線装置を使用する医療従事者の防護に、可能な限り**放射線防護板**を使用することを推奨している。
- 放射線防護の原則に関する **医療従事者および学生への教育と訓練**が、これまで以上に求められる。

[ICRP 117 画像診断部門以外で行われるX線透視ガイド下手法における放射線防護 \(2010\).](#)

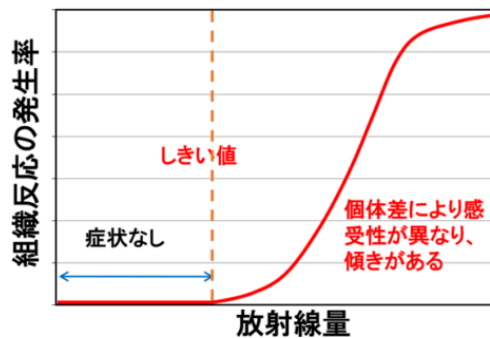
ヒトへの放射線影響

- ヒトへの放射線影響は、影響の発生にしきい値を持つ**組織反応**と、線量に応じて発生率が上がる**確率的影響**に分類されます。
- 組織反応としては脱毛、不妊、白内障、流産・身体的・精神的障害 (胎児) などが、確率的影響としてはがん・白血病と、遺伝性変異が挙げられます。



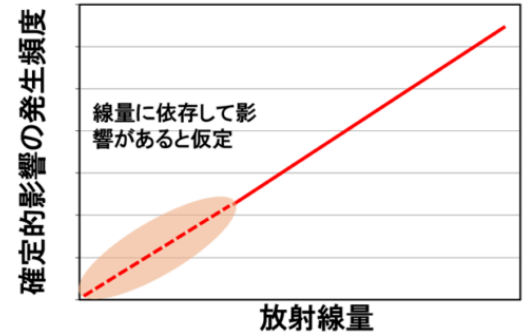
組織反応

- 同じ線量を多数の人が被ばくした時、1%の人に症状が現れる線量をしきい線量と言う。



確率的影響

- 線量に比例し影響の発生頻度が増える。
- 100mSv以下では、他のリスクに埋もれるくらい発生頻度が低く、明確になっていない。



主な組織反応に対するしきい線量（ICRP103、118等より）

（[ICRP103](#)、[ICRP118](#)）

影響の種類	影響を受ける臓器/組織	しきい線量 (mGy)
一時的不妊（男性）	生殖腺	100
一時的不妊（女性）	生殖腺	650 - 1500
永久不妊（男性）	生殖腺	6000
永久不妊（女性）	生殖腺	3000
白内障	眼の水晶体	500
白血球減少	骨髓	500
皮膚紅斑	皮膚	3000 - 6000
一時的脱毛	皮膚	4000

- 胎児への影響（[ICRP 105](#)等）

時期	放射線影響	しきい線量 (mGy)
着床前期（受精-15日）	流産	100
器官形成期（受胎後3-8週）	奇形・身体的発育障害	100
胎児期（受胎後8-15週）	精神・知能発達障害	100 - 200

がんと遺伝的影響に対するリスク

（[ICRP 103 表A.4.4](#)）

様々ながんに対して、男女のリスクを平均、致死率、QOLを考慮して算出された生涯のリスク推定値 (10^{-2} /Sv)。

被ばく集団	がん	遺伝的影響	合計
全集団	5.5	0.2	5.7
就労年齢集団(18－64歳)	4.1	0.1	4.2

放射線の人体影響

- 放射線教育講習プログラム（産業医科大学 産業生態科学研究所 [放射線健康医学研究室](#)、岡崎龍史 教授作成）
 - [放射線の人体影響\(1\)](#)
 - [放射線の人体影響\(2\)](#)
 - [放射線の人体影響\(3\)](#)
 - [放射線の人体影響\(4\)](#)
 - [放射線の人体影響\(5\)](#)

環境省 放射線による健康影響等に関する統一的な基礎資料

[放射線による健康影響等に関する統一的な基礎資料（令和3年度版）](#)

- [発がんの仕組み](#)
- [放射線感受性の高い組織・臓器](#)
- [年齢による感受性の差](#)
- [低線量率被ばくの発がんへの影響](#)
- [固形がんによる死亡と線量との関係](#)
- [白血病と線量反応関係](#)
- [白血病の発症リスク](#)
- [被ばく時年齢と発がんリスクの関係](#)
- [被ばく時年齢別発がんリスク](#)
- [がん種類別被ばく時年齢とリスク](#)

医療従事者の放射線障害の事例

医療従事者の電離放射線に係る皮膚がんの労災認定について
(平成24年度～平成29年度(9月



【認定事例】

職種	主な業務内容	電離放射線業務 従事通算年数
准看護師	エックス線透視を使用した大腸内視鏡検査時における患者補助等	19年
整形外科医	エックス線透視を使用した脊髄造影、神経根ブロック、椎間板造影ブロック等	16年
診療放射線技師	胃・腸エックス線透視撮影等	30年
整形外科医	エックス線透視を使用した脊髄造影、神経根ブロック、骨折整復固定、矯正骨切り術等	26年

※ いずれも慢性放射線皮膚障害の認定要件である 25,000mSv 以上被ばくしていた。

医療従事者のがん発生率コホート調査

[Mastrangelo G: Increased cancer risk among surgeons in an orthopaedic hospital. Occupational Med 55 498-500, 2005](#)

- 放射線防護の実践が不十分な病院において7年間に5名のがん症例が報告された。その病院で線量管理をしている放射線診療従事者の25年間のデータからがんリスクが増加しているか調査を実施した。対象は放射線診療従事者156名、非放射線診療従事者158名で、累積がん発生率は、整形外科、整形外科以外以外の医療従事者、被ばくのない医療従事者で、それぞれ29(9/31)、6(8/125)、および4%(7/158)だった。ロジスティック回帰分析では、整形外科医の腫瘍のリスクが有意に($P < 0.002$)増加した。被ばくの多い医療機関において十分な放射線防護対策が求められる。

	被ばく [mSv]	累積がん発生率	オッズ比	P 値
基準：被ばくをしない医療従事者	-	4% (7/158)	1.04	
医師以外の医療従事者	7.5 (0.0-186)	6% (6/107)	1.07	0.901
整形外科医以外の医師	2.3 (0.0-17.9)	11% (2/18)	2.18	0.349
整形外科医	35.2 (0.04-517.8)	29% (9/31)	5.37	0.002

整形外科のIVR中に術者の指が照射野に入っている例

- 手外科におけるX線透視下手術の例が示され、「対象が小さいため術者の手指の直接被ばくが避けられない」と説明

[石垣大介, 手外科手術における手指職業被曝と対策. 臨床整形外科. 55\(2\), 149-153. 2020.](#)

手への直接放射線被曝と爪甲色素線条および手荒れとの関連: 最小侵襲脊椎治療学会(MIST)による調査

[Y. Hijikata, et al. Association of occupational direct radiation exposure to the hands with longitudinal melanonychia and hand eczema in spine surgeons: a survey by the society for minimally invasive spinal treatment \(MIST\), Eur Spine J. 2021.](#)

脊椎外科医における職業上の手指への被ばくと爪の色素沈着である爪甲色素線条(LM: longitudinal melanonychia)および手指湿疹との関連を日本低侵襲脊椎治療学会を対象としたウェブ上のアンケート

調査を行った。直接被ばくが多い手の群（高被ばく群）と少ない手の群（対照群）に分け、高被ばく群の手におけるLMと手湿疹の有病率の調整オッズ比3.18（95%CI：2.24-4.52）、手指のは2.26（95%CI：1.67-3.06）であった。本研究では、医師の手の被ばくがLMおよび手湿疹とが示唆された。

NHK：放射線業務により健康障害（皮膚がん）が出た医師への取材

https://www3.nhk.or.jp/news/special/sci_cul/2021/03/story/story_210302/

血管造影検査に係る医療従事者の水晶体混濁

[O. Ciraj-Bjelac, Catheterization and Cardiovasc Interv 2010; 76:826-834.](#)

- Contorol 9%の有病率に対して、血管造影術者（医師）の有病率は52%、同領域での看護師の有病率は45%
- 相対リスクはそれぞれ5.7倍、5.0倍



TABLE I. Basic Demographic Data and Lifetime Cumulative Radiation Dose to the Lens of the Eye for the Interventional Cardiology Staff

Subjects	Number	Age ^a (years)	Number of years of work in interventional cardiology ^a	Cumulative dose to the lens (Gy) ^a
Interventional cardiologists	56	42 ± 7 (31-64)	9.2 ± 6.9 (1.0-33)	3.7 ± 7.5 (0.02-43)
Nurses	11	38 ± 11 (25-53)	6.0 ± 4.6 (1.0-14)	1.8 ± 3.1 (0.01-8.5)
Control group	22	44 ± 9 (29-57)	n/a	n/a

^aMean ± standard deviation; values in parentheses are ranges.

TABLE II. Dose Response for Posterior Lens Changes in Cardiologists and Nurses and Associated Odds Ratios (OR), Relative Risk (RR), and 95% Confidence Intervals (CI)

Dose (Gy)	Number of subjects	Number of subjects with posterior lens changes ^a	OR	95% CI	RR	95% CI
0 (Control)	22	2 (9%)	1.0	n/a	1.0	n/a
<1	31	12 (39%)	6.3	1.2-32	4.3	1.0-17
1<2	11	5 (45%)	8.3	1.3-54	5.0	1.1-22
2-<3	9	5 (55%)	12.5	1.7-89	6.1	1.4-26
≥3	16	12 (75%)	30	4.7-189	8.3	2.1-32
Total exposed: 67		34 (51%)	10.3	2.2-48	5.6	1.4-21

^aCataract grade 0.5 or higher in one eye.

心臓インターベンション担当者の放射線白内障リスク

[E. Vano, Radiation cataract risk in interventional cardiology personnel, Radiat Res. 2010](#)

インターベンショナル・カーディオロジー従事者の職業性被曝後の放射線白内障のリスクを評価した。合計116人の被ばく者と93人の同世代の非被曝者が調査された。インターベンショナル・カーディオロジストにおける後囊下混濁の相対リスクは、非被曝対照者と比較して3.2%（38%対12%；P<0.005）であった。看護師と技師の合計21%に放射線に関連する水晶体後面の変化が認められた。水晶体線量の累積中央値は、循環器内科医で6.0 Sv、関連医療従事者で1.5 Svと推定された。心臓インターベンション手技に関わる医療従事者の放射線に関連した水晶体変化の発生率が有意に高いことから、白内障の可能性を減らすために、これらのスタッフに放射線防護に関する教育を行うことが緊急に必要なことが示唆される。

放射線防護の
重要性

職業被ばくの
線量限度と実態

線量評価
・モニタリング

医療現場での放
射線防護の原則

部門別防護対策

アクション
チェックリスト

放射線防護教
材・関連資料

Contents

被ばくの種類



職業被ばく：業務によ
て作業者が被るすべての
被ばく

放射線業務従事者の線量限
度



線量限度 考え方のポイ
ント

水晶体等価線量限度引き下
げの経緯



日本国内での対応

改正電離放射線障害防止規
則のポイント



防護眼鏡等を使用する場
合

水晶体等価線量のモニタ
リングについて

改正省令附則第2条関係
「経過措置対象医師」

都道府県労働局と都道府
県等衛生主管部局との連
携

国内の放射線診療従事者の
水晶体被ばくの実態



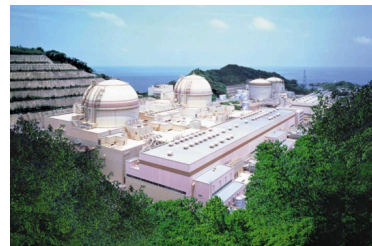
職種別実効線量と水晶体
等価線量の関係

医師の診療科別年間水晶
体等価線量分布

職業被ばくの線量限度と実態

被ばくの種類

職業被ばく	業務の過程で職業人として受ける被ばく
医療被ばく	放射線診断や治療の過程で患者や介助者として受ける被ばく
公衆被ばく	それ以外の被ばく



職業被ばく：業務によって作業者が被るすべての被ばく

放射線業務従事者

- 放射性同位元素または放射線発生装置の取扱い、管理またはこれに付随する業務に従事するものであって、**管理区域に立ち入るもの**（RI規制法施行規則第1条）
- 管理区域内において放射線業務に従事する労働者（電離放射線障害防止規則第4条）
- 【放射線診療従事者】エックス線装置等の取扱い、管理またはこれに付随する業務に従事するものであって、管理区域に立ち入るもの（医療法施行規則第30条の18）

放射線業務従事者の被ばくによる組織反応（体のある臓器への障害）の発生を抑え、確率的影響（全身のがんのリスク）の発生を「容認できるレベルに抑える」ために、法令において**線量限度**が設定されています。

放射線業務従事者の線量限度

（電離放射線障害防止規則 第4条）

	実効線量限度	等価線量限度
通常作業	100 mSv/5年 ^{※1} かつ 50 mSv/年 ^{※2}	水晶体：100 mSv/5年 ^{※3} かつ50 mSv/年 ^{※2} 皮膚：500 mSv/年 ^{※2}
緊急作業	100 mSv	水晶体：300 mSv 皮膚：1 Sv
女子 ^{※4}	5 mSv/3月 ^{※5}	
妊娠中の女子	内部被ばく：1 mSv ^{※6}	腹部表面：2 mSv ^{※6}

※1: 平成13年4月1日以後5年ごとに区分した各期間（2001.4.1～2006.3.31, 2006.4.1～2011.3.31, ……）

※2: 4月1日を始期とする1年間

※3: 令和3年4月1日以後5年ごとに区分した各期間（2021.4.1～2026.3.31, 2026.4.1～2031.3.31, ……）

※4: 妊娠不能と診断された者、妊娠の意思のない旨を使用者等に書面で申し出た者および妊娠中の者を除く

※5: 4月1日、7月1日、10月1日および1月1日を始期とする各3月間

※6: 本人の申出等により管理者等が妊娠の事実を知ったときから、出産までの間について（医療法施行規則・RI等規制法施行規則）、妊娠と診断されたときから出産までの間について（電離放射線障害防止規則）

線量限度 考え方のポイント

- 計画被ばく状況(平常時の業務)から個人が受ける、管理上超えてはならない実効線量又は等価線量の値。
- 安全と危険の境界を示す線量、放射線障害のしきい線量ではない
- 医療被ばくには適用しない
個々のケースで正当化、最適化が重要
- 自然放射線による被ばくを除く
- 実効線量限度：確率的影響について受け入れられるレベルを考慮して決定
- 等価線量限度：組織反応を考慮

水晶体等価線量限度引き下げの経緯

1984年	ICRP Publ.41で視覚障害性白内障の急性被ばくによるしきい線量は5 Gy、水晶体の等価線量限度を150 mSvと勧告
2003年	ICRP Publ. 92で、白内障のしきい線量がより低い可能性を指摘
2006年	TG 63「(低LET放射線の) 組織反応と非がん影響」を立ち上げ 低LET放射線の疫学的知見(比較的長期間の追跡結果) 原爆被爆者の被ばく後55-57年の白内障や、チェルノービリ事故清掃員における被ばく後12-14年の白内障が有意に増加⇒しきい線量 0.5 Gy
2011年	ICRP主委員会会合で「組織反応に関する声明」を発表(ソウル声明)
2012年	ICRP Publ. 118「組織反応に関するICRP声明」を刊行

ICRP Publ.118は2つの仮定に基づくもので、この妥当性は今後も検証が必要

- 生物影響は急性被ばく、多分割・遷延被ばく、慢性被ばくで同じ
- 全ての微小混濁が被ばく後20年以降で視覚障害性白内障に進行

影響	しきい線量			水晶体の等価線量限度
	急性被ばく	多分割・遷延被ばく	慢性被ばく (数年以上の長期被ばく)	
ICRP 41 (1984)				
検出可能な混濁	0.5- 2 Gy	5 Gy	> 0.1 Gy/年	150 mSv/年
視覚障害性白内障	5 Gy (2-10 Gy)	> 8 Gy	> 0.15 Gy/年	
ICRP 118 (2012)				
検出可能な混濁	N.A.	N.A.	N.A.	5年平均20 mSv、かつ いかなる1年間も50 mSvを超えないこと
視覚障害性白内障	0.5 Gy	0.5 Gy	0.5 Gy	

生涯線量1 Sv (20 mSv/年 × 50年) となるので最適化が必要

日本国内での対応

- 放射線審議会「眼の水晶体の放射線防護検討部会」を2017年6月に設置し、「眼の水晶体に係る放射線防護の在り方について」として報告書を作成し関係行政機関へ意見具申(2018.3)
- 厚生労働省「眼の水晶体の被ばく限度の見直し等に関する検討会」6回の検討会後、報告書を作成

労働安全衛生法

- 職場における労働者の安全と健康を確保
電離放射線障害防止規則（電離則）
（放射線障害防止の基本原則）第1条 事業者は、労働者が電離放射線を受けることできるだけ少なくするように努めなければならない。

改正電離放射線障害防止規則のポイント

令和3年4月1日施行

1. 水晶体等価線量限度を1年につき**50 mSvに引き下げ、5年間で100 mSvを追加**
（新電離則第5条関係）
2. 外部被ばく線量に**3mm線量当量**が加えられ、放射線の種類とエネルギーに基づき、適切と認められるもので測定する（新電離則第8条関係）
※保守的に算定する場合は、1cm線量当量及び70μm線量当量について測定する。
3. 水晶体等価線量について、3月ごと及び1年ごとの合計に加え、**5年ごとの合計を算定して記録し**、原則として30年間保存（新電離則第9条関係）
4. 令和3年4月1日から令和5年3月31日までの間、対応の困難な医師に対して、**経過措置**を設ける（改正省令附則第2条関係）

防護眼鏡等を使用する場合

(基発1027第4号 2020.10)

水晶体等価線量を低減する効果がある個人用防護具（防護眼鏡等）を使用している場合、法定の部位に加え、防護眼鏡等によって受ける等価線量が低減されている状態の**水晶体等価線量を正確に算定するために適切な測定が行える部位に放射線測定器を装着**し、当該測定器の結果に基づき算定した線量を水晶体等価線量としても差し支えない。



DOSIRIS（千代田テクノル）

https://www.c-technol.co.jp/radiation_monitoring/monitoring07



ビジョンバッジ（長瀬ランダウア）

<https://www.nagase-landauer.co.jp/luminess/vision-badge.html>

水晶体等価線量のモニタリングについて

頸部バッジと水晶体専用線量計の線量比

- 本データは頭頸部用ルミネスバッジと眼部用ビジョンバッジの両方が返却され測定した7,713件（1,823名分）の線量を対象に集計。

1ヶ月当たりの平均値は、頭頸部1.331 mSvに対し、眼部0.332 mSvと、約4分の1程度の線量になった。（表1） 7713件中296件（4%）は1.7mSv/月を超えていた。



表1 7,713 件の頭頸部と眼部の平均線量

頸部バッジの平均値	水晶体線量計の平均値	頸部と水晶体の比
1.331 mSv	0.332 mSv	0.249

長瀬ランダウアNLだよりNo.531 2022/03

改正省令附則第2条関係 「経過措置対象医師」

適切な防護措置を講じても水晶体等価線量が100 mSv/5年を超えるおそれのある医師で、高度の専門的知識経験を要し、後任者を容易に得ることができないもの

令和3年4月1日～令和5年3月31日:50 mSv/年
令和5年4月1日～令和8年3月31日:60 mSv/3年、かつ50 mSv/年
令和8年4月1日～:100 mSv/5年、かつ50 mSv/年 } 経過措置期間

* 令和5年3月31日までに事業者が衛生委員会での調査審議等を経て指定する必要がある

眼の水晶体に受ける等価線量が継続的に1年間に20 mSvを超えるおそれのある者※に対する健康診断(基発第568号)

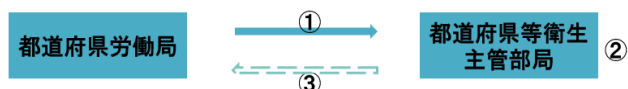
- ・ 白内障に関する眼の検査を電離則第56条第3項の規定により省略することは適当でない
- ・ 白内障に関する眼の検査は、眼科医により行われることが望ましい

※ 健康診断を行う前年の1年間に眼の水晶体に受けた等価線量が20 mSvを超えており、かつ、当該健康診断を行う年の1年間に水晶体等価線量が20 mSvを超えるおそれのある者

都道府県労働局と都道府県等衛生主管部局との連携

令和3年1月28日付け基安労発 0128 第1号

実効線量又は眼の水晶体の等価線量が年間20mSv～50mSvの労働者がいる病院・診療所の事業場の情報について、都道府県労働局と都道府県等衛生主管部とで共有する仕組みの運用を令和3年度から開始 ※眼の水晶体の等価線量については令和4年度から開始



- ① 電離放射線障害防止規則第58条に基づき事業場から労働基準監督署に提出された電離放射線健康診断結果報告書に、前年の実効線量又は水晶体等価線量が20～50 mSvである労働者がいる旨の記載がある病院・診療所の情報を、都道府県労働局から衛生主管部局に提供する。
- ② 主管部局は、医療法に基づく立入検査の参考資料とするほか、労働局より情報提供があった旨を連絡する等、注意喚起を行う際の参考資料として活用する。
- ③ 立入検査において実施した指導内容等を、必要に応じ都道府県労働局へ回報する。

国内の放射線診療従事者の水晶体被ばくの実態

2017,18 JSRT学術調査研究班

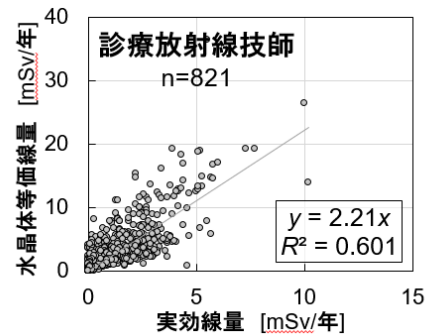
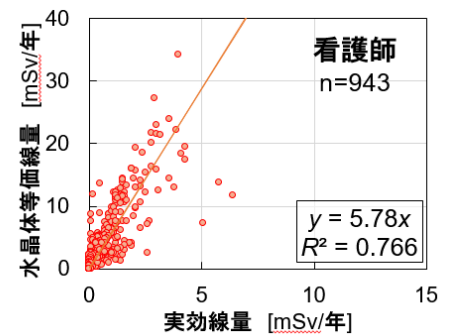
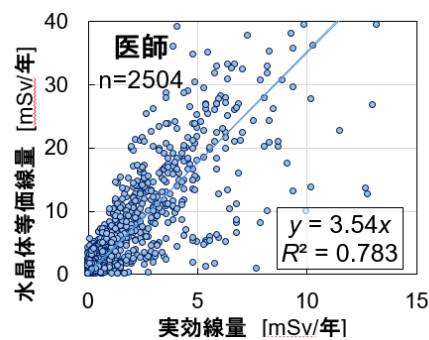
- ・ 国立病院機構の放射線診療従事者の職種別・業務別水晶体等価線量を調査(延べ4493名・年) 不均等被ばく管理をしている医療従事者のうち、2.9%が20mSv/年を超えている*

*防護眼鏡の効果は考慮していない

水晶体等価線量/年 [mSv/y]	医師	看護師	診療放射線技師	その他の職種	総数
0	1151	505	94	115	1865
≤2.5	711	257	446	104	1518
≤5	191	67	152	5	415
≤10	173	57	86	1	317
≤20	159	46	41		246
≤30	67	7	1		75
≤50	37	2	1		40
≤75	10	1			11
≤100	5	1			6
総数	2504	943	821	225	4493

藤淵 他：放射線診療従事者の不均等被ばく管理の実態に基づく水晶体被ばく低減対策の提案、日放技誌 (2021)

職種別実効線量と水晶体等価線量の関係



- 看護師は女性が多くバッジ位置が腹部と頸部で距離があるため
- 職種による防護衣の鉛当量、体幹部と頸部バッジ装着間違い
- 職種による被ばく状況の違い

(男女での比較)

男性： $y = 3.29x$ $R^2 = 0.754$

女性： $y = 4.67x$ $R^2 = 0.711$

医師の診療科別年間水晶体等価線量分布

管理	均等	不均等被ばく管理										
水晶体 mSv/年	整形外科	循環器 内科	消化器 内科	消化器 外科	放射線 診断科	整形外科	泌尿器 科	放射線 科	脳神経呼 外科	呼吸器 科	小児科	その他
0	62	63	73	32	63	78	49	54	57	87	142	9
≤2.5	6	71	85	27	37	38	40	20	39	69	158	7
≤5		28	37	3	7	6	8	5	14	31	26	1
≤10		49	28	5	16	4	2	14	9	15	9	5
≤20	1	58	45	1	6	10		9	9	6	3	4
≤30		30	11	3	6	4	2	3	2	3	2	1
≤50	1	18	11	2	2	1	2					1
≤70		1	6			2			1			
≤100			5									
総計	317	318	301	73	137	143	103	105	131	211	340	28
>20	1	49	33	5	8	7	4	3	3	3	2	2
	0.3%	15.4%	11.0%	6.8%	5.8%	4.9%	3.9%	2.9%	2.3%	1.4%	0.6%	7.1%

①循環器内科318人中、49人（15%）、次いで②消化器内科301人中、33人（11%）、③消化器外科（6.8%）以下と差が大きい。

看護師の所属別年間水晶体等価線量分布

水晶体 mSv/年	外来	救急 救命 センター	血管撮 影	歯科	手術 室	心臓 血管 外科	診療 看護 師	内視 鏡	病棟	不妊 診療 科	放射 線科	放射 線治 療科	放射 線診 断科	麻酔 科	集計
0	178	1		1	255	2	5	1	57		2			3	505
≤2.5	137	2	11		52	2	13		27	1	8	1	1	2	257
≤5	48	2	2		2		2	1			10				67
≤10	31		4		1		1		3	1	16				57
≤20	25		7					5			9				46
≤30	4							3							7
≤50								2							2
≤70								1							1
≤100								1							1
総計	423	5	24	1	310	4	21	14	87	2	45	1	1	5	943

- ・看護師の所属は回答がまばらなため判定は難しい。
- ・病棟や手術室ではなく、外来でX線透視室、内視鏡室での検査に携わる看護師が超える可能性が分かる。

診療放射線技師の主要業務別月間水晶体等価線量分布

水晶体 等価線量 [mSv/月]	一般撮影	CT	血管造影	X線透視	MRI	放射線治療	核医学	PET
N.D.	284	136	48	16	169	124	3	10
≤ 0.5	2693	528	419	35	432	267	132	144
≤ 1.0	441	116	24	5	15	11		1
≤ 1.5	146	58	7	2	3	1		
≤ 2.0	50	17		2	1	2		
≤ 5.0	41	19			2	1		
≤ 10	2	5	1					
≤ 20								
≤ 20.5		1						
計	3657	880	499	60	622	406	135	155
>2 超の割合 [%]	1.18	2.84	0.20	0	0.32	0.25	0	0

- ・月別主担当業務を集計
- ・CTと一般撮影が高く、X線透視室、血管造影を担当して20 mSv/年を超える可能性は低い
- ・MRIは、当直等の業務の影響と考えられる

実態調査結果のまとめ

- ・水晶体等価線量が20 mSv/年を超える可能性の比較的高い職種は、透視業務に携わる医師と看護師

- 水晶体被ばくの高い所属や業務は、
 - 医師：循環器内科、消化器内科、消化器外科、放射線科、整形外科、
部署として血管造影室、X線透視室、内視鏡室、手術室
 - 看護師：X線透視室、内視鏡室での検査に携わる者
 - 診療放射線技師：CTと一般撮影であり、X線透視室、血管造影を担当して20 mSv/年を超える可能性は低い
- 今回のデータは防護眼鏡による遮蔽は考慮していない
- 水晶体被ばくの可能性の高い部署での適切な不均等被ばく管理と防護対策が求められる⇒防護の最適化

放射線防護の
重要性

職業被ばくの
線量限度と実態

線量評価
・モニタリング

医療現場での放
射線防護の原則

部門別防護対策

アクション
チェックリスト

放射線防護教
材・関連資料

Contents

個人線量計



末梢部（手指）測定用線
量計

水晶体線量線量計

個人線量計の装着位置

外部被ばく線量の評価法



ワイヤレス線量計システ
ムの例

個人モニタリング結果の活
用

線量評価・モニタリング

個人線量計

- 放射線管理区域で作業を行う作業員（放射線業務従事者）が被ばくした放射線の量（線量）を測定する機器。
- 個人線量計により被ばくの積算線量を知ることができる。
- 電子式の直読式のものであれば、一定期間ごとあるいは作業ごとに、被ばくの程度を自分で確認することができる。
- 放射線防護対策を検討するには、まず個人の被ばく量を把握する必要がある。

種類	特徴
ガラスバッジ 、千代田テクノロ （蛍光ガラス線量計：RPLD、 0.1mSv - 10Sv(X/γ)（広範囲 用）） ルミネスバッジ 、長瀬ランダウア （光刺激ルミネセンス線量計： OSLD、0.01mSv - 10Sv(X/γ)） TLDバッジ 、産業テック（熱ルミ ネセンス線量計、0.01mSv - 10Sv(X/γ)）	- 放射線が当たると線量に応じてガラスやプラス チック素子に情報が蓄積され、レーザー光等で刺 激することで、線量に応じて発光し、その量から 線量を推定する。 - 電池が不要。 - 測定サービス会社に返送し値を読み取るため、 リアルタイムに線量を知ることが出来ない。 - 電子式に比べ感度が低い。
電子式個人線量計 PDMシリーズ 、日本レイテック DOSEi 、富士電機	- シリコン半導体に入射した放射線を電気信号と して捉え、線量に換算する。 - リアルタイムに読み取ることが出来る - 感度が高い（0.1 μSvから検出可、*種類により 異なる） - 一定の線量を感じると警報（アラーム）やバ イブレーションで知らせる機能のついているもの もある。 - コイン電池等電源が必要。 - 機械的衝撃に弱い。 - 他の電磁波で誤作動を起こす可能性がある。

個人線量計の例



末梢部（手指）測定用線量計

種類	特徴
ガラスリング 、千代田テクノル (0.1 mSv - 1 Sv、24 keV - 3 MeV(X/γ))	- 指輪型の線量計。中には個人線量計同様小さなガラス素子やTLD等が入っている。 - 指先の被ばくが体幹部より大きい可能性がある場合、着用する。
リングバッジ 、長瀬ランダウア (0.2 mSv - 1 Sv、15 keV - 6.3 MeV(X/γ))	

水晶体線量線量計

種類	特徴
DOSIRIS 、千代田テクノル (0.1 mSv - 1 Sv、24 keV - 1.25 MeV(X/γ))	- 中にTLDが含まれ、3mm線量当量を測定する。 - 眼の近傍に配置し防護眼鏡による遮蔽効果を反映した線量を評価できる。
ビジョンバッジ 、長瀬ランダウア (0.1 mSv - 1 Sv、15 keV - 6.3 MeV(X/γ))	

個人線量計の装着位置

- 厚生労働省 [線量測定 of 適切な方法（リーフレット）](#)

線量測定は適切な方法で実施してください

管理区域に立ち入る方は、一時的に立ち入る場合（注）も含めて、
全ての方が胸または腹部に放射線測定器を装着しなければなりません。

電離放射線障害防止規則第8条第3項に定める線量の測定方法

ケースⅠ 均等被ばくの場合

放射線測定器 1個が必要です。

装着位置

A	男性、または妊娠する可能性がないと診断された女性	胸部
B	A以外の女性	腹部

いずれか1か所

「均等被ばく」と「不均等被ばく」

「不均等被ばく」とは、体に受ける被ばく線量が均等でないことをいい、防護エプロンを使用する場合などが該当します。

頭部・頸部
胸部・上腕部
腹部・大腿部
体幹部
末端部

ただし

ケースⅡ 不均等被ばくの場合 **放射線測定器 2個以上が必要**です。

装着位置（追加）

ケースⅠの装着位置に加えて、体幹部及び末端部のそれぞれについて、最も多く放射線にさらされるおそれのある部位に装着する必要があります。

体幹部の装着位置

体幹部のうち、最も多く放射線にさらされるおそれのある部位※

※ 最も多く放射線にさらされる部位が、ケースⅠと同一である場合、放射線測定器の追加は不要です。

< 体幹部における装着例 >

防護エプロンに覆われていない襟元

医療現場では、防護エプロンを着用することがあるため、体幹部で不均等被ばくとなる場合があります。

末端部の装着位置

末端部のうち、最も多く放射線にさらされるおそれのある部位※

※ 末端部の被ばく線量が体幹部の被ばく線量を下回る場合、放射線測定器の追加は不要です。

< 末端部における装着例 >

X線透視下で手術を行う手首

医療現場では、手術等を行うため、末端部（手や足）で不均等被ばくとなる場合があります。

（注）一定の確証ができる場合には例外があります。



ひと・くらし・
みらいのために

厚生労働省・都道府県労働局・労働基準監督署

外部被ばく線量の評価法

- 放射線取扱者の外部被ばく測定は原則として個人線量計を用いて行う。
- 線量計装着部位は**胸部**（妊娠可能な女性（女子）※は**腹部**）であるが、それら以外の体幹部（頭頸部など）が**最大被ばく時はその部位も測定**（1 cm線量当量、70μm 線量当量）する。
- また**手足指などが最大被ばく**となる時はその部位の70μm 線量当量も測定する。
- 測定は、管理区域立入り中は継続して行う。
- なお一時的立入者（放射線業務従事者以外）で**実効線量が100 μSv を超えない場合は測定しなくてもよい**。

外部被ばく線量の評価法

体幹部の分類

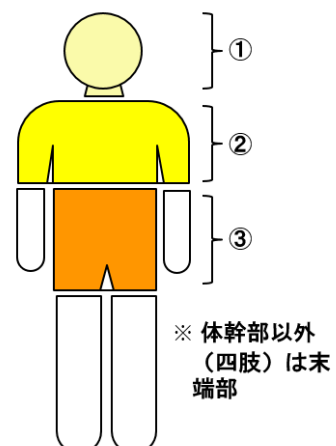
- ①頭部・頸部
- ②胸部・上腕部
- ③腹部・大腿部

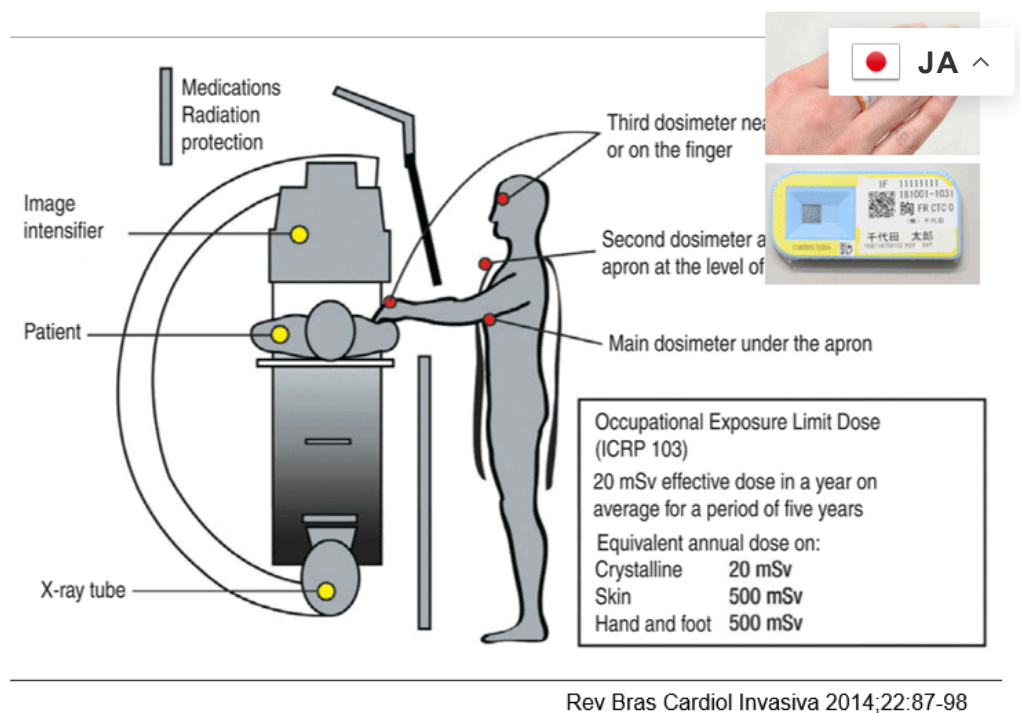
体幹部が均等に放射線を受ける場合

→ **均等被ばく**

他の箇所が多く放射線を受ける場合
（防護衣を着ている場合）

→ **不均等被ばく**





ワイヤレス線量計システムの例

- 透視手技中に手を触れることなくリアルタイムに画面表示、警告音等で被ばく量を示すことで、術者自身の被ばく状況や危険な場所を把握することができ、不要な被ばくの低減につなげることができる。

リアルタイム線量計（Raysafe i3）の使用例

- 放射線防護板の高さによる術者の眼部、頸部、胸部、腹部の線量をワイヤレス線量計で表示
- 透視照射時、線量率がカラーバーで表示（横軸は指数スケール）。
- 防護板の位置が高いと頸部の値が高くなってしまう。（散乱線が患者から発生している）



術者の4か所に線量計を配置
Red:眼部、Blue:頸部
Green:胸部、Gray:腹部
* 全て防護衣の外側に配置



防護板:無し



防護板:頭頸部の高さ



防護板:胸部の高さ



防護板:腹部の高さ

Raysafe i3でのリアルタイム線量評価の様子



タブレット画面



体に装着した放射線検出器からの信号をリアルタイムにタブレットに表示



個人モニタリング結果の活用

被ばく線量の超過・増加が認められた



原因を調査



(スタッフ)業務内容・作業手順の見直し
(管理者) 防護対策の提案、整備

防護の最適化

放射線診療従事者が受けている値がどの程度のものか把握し、結果をフィードバックすることが大切



放射線防護の
重要性

職業被ばくの
線量限度と実態

線量評価
・モニタリング

医療現場での放
射線防護の原則

部門別防護対策

アクション
チェックリスト

放射線防護教
材・関連資料

Contents

➤ 医療現場における外部放射
線防護の原則

➤ 医療放射線での散乱線の特
徴

➤ 遮蔽による放射線防護・放
射線防護具の利用



➤ 放射線防護衣

➤ ネックガード

➤ 放射線防護眼鏡

➤ 放射線防護用手袋

➤ 放射線防護用帽子

➤ 放射線防護板

➤ 放射線防護カーテン

➤ 放射線防護板の位置によ
る散乱線分布の変化

➤ 時間による放射線防護・照
射時間の短縮

➤ 距離による放射線防護・散
乱線分布の把握

➤ 照射条件・手技による防護



➤ 照射条件による術者の被
ばくの増減

➤ 検査手技の観察による防
護対策の振り返り学習

➤ X線装置の管理

➤ X線透視における従事者防護
の要点

➤ 医療従事者からよくある質
問

医療現場での放射線防護の原則

■ 医療現場における外部放射線防護の原則

医療現場での外部放射線防護の三原則

- 距離： 放射線源、散乱線源を意識し、可能な限り距離をとる。
- 時間： 放射線照射時間は、最小限にとどめる。
- 遮蔽： 散乱線源と作業者の間に放射線遮蔽板を配置する。

その他、医療での放射線防護 適切な条件の設定や装置の品質管理を実施する

(照射条件の最適化)

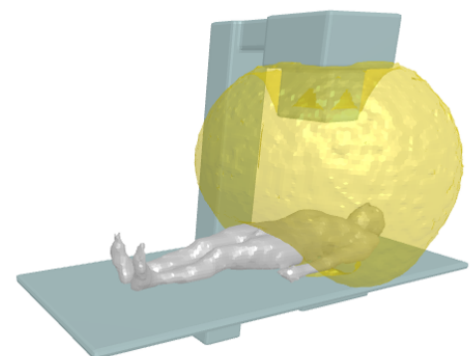
- 診療可能な最低限の画質となるよう、出力、パルスレートや撮影枚数、照射野を調整する、画像検出器と患者を可能な限り近づける

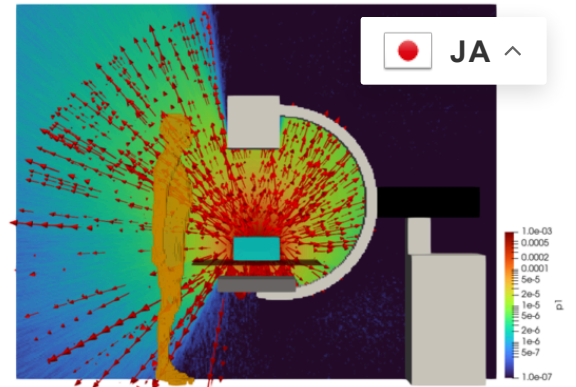
(照射野に手を入れない)

- 照射野内外で100倍以上線量が異なる。手指の皮膚障害、皮膚がんの可能性

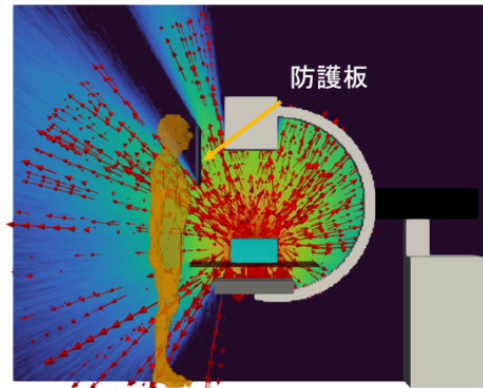
■ 医療放射線での散乱線の特徴

- X線が患者に衝突し、患者を中心に広がる
- 患者からの後方散乱成分が多い
- 患者による吸収もある

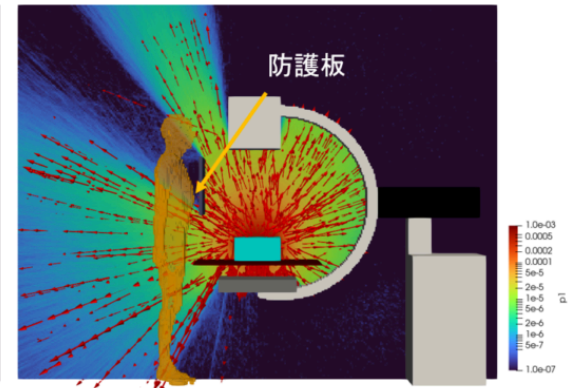




防護板無し



防護板: 床から130 cm



防護板: 床から110 cm

Scattar doses at mobile radiography



<https://contsrv.icer.kyushu-u.ac.jp/Medu/XraySim/>

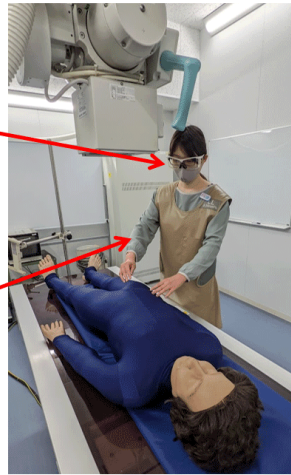
■ 遮蔽による放射線防護・放射線防護具の利用

放射線防護眼鏡

- ・鉛当量により、遮蔽能力、重量が異なる
- ・顔との隙間がないようにする

放射線防護衣

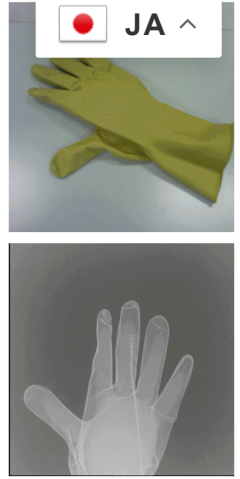
- ・鉛当量により、遮蔽能力、重量が異なる
- ・甲状腺被ばく対策用にネックガードもある。



放射線防護衝立



放射線防護手袋



放射線防護衣

(PMDAの一般的名称「放射線防護用前掛」、「放射線防護用胸部前掛」、「放射線防護用生殖腺防護具」、「放射線防護用掛布」)

軽量の放射線防護衣

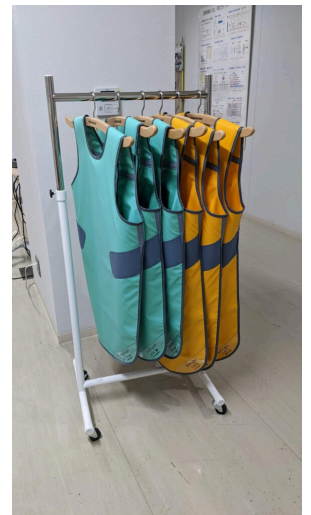
- ・鉛製エプロンの重さは、スタッフに不快感を与えるため、疲労や背骨を含む筋骨格系の問題には特別な配慮が必要である(Papadopoulos et al., 2009; NCRP, 2010; Klein et al., 2015)。ウエストコートとスカートで構成されるツーピースエプロンは、人間工学に基づき体重の一部を腰で支えることで、背中への負担を軽減することができる。
- ・鉛の代わりにスズやビスマスのような高原子番号の元素を含む軽量のエプロンがある。代替金属は単位質量あたりのエネルギーが 40 keV から 88 keV の X 線光子を吸収するのに鉛よりも効率的であるため、軽量のエプロンでも同様の減衰を実現できる(ただし組成により減衰特性は異なり、100 kVを超える管電圧では注意が必要(Christodoulou et al., 2003))。
- ・全体を覆うコート型は、素材が重なる部分は2倍の鉛当量になる。

放射線防護用前掛の添付文書一覧 [\[PMDAサイト\]](#) (エプロン、コート)

放射線防護用胸部前掛の添付文書一覧 [\[PMDAサイト\]](#) (ベスト)

放射線防護用生殖腺防護具の添付文書一覧 [\[PMDAサイト\]](#) (スカート、スタンド)

放射線防護用掛布の添付文書一覧 [\[PMDAサイト\]](#) (腹巻のようにスタッフの腹に巻きマジックテープで止めたり、患者に掛ける)



ネックガード

(PMDAの一般的名称「放射線防護用カラー」、「放射線防護用甲状腺防護具」)

甲状腺の放射線防護

- ・放射線防護衣は頸部を防護しない。甲状腺用の放射線防護カラー(ネックガード)を着用していない場合、若者では放射線感受性の高い甲状腺への線量が、実効線量の値の2倍になる可能性がある。
- ・防護対策例として若年および年間の実効線量が4mSvを超える放射線診療従事者にはネックガードを使用することが提案されている(Wagner, 2004)。
- ・ネックガードはきつく締めると不快な場合があると緩すぎると十分カバーできない可能性がある。
- ・外科用Cアーム透視装置により処置をする場合、手術室での防護措置は積極的に行われていないこともあり、ネックガードを使用する必要があるリスク評価を実施する。

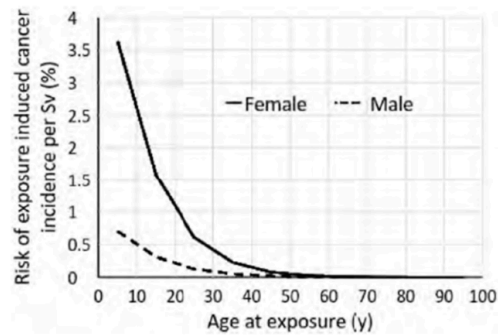
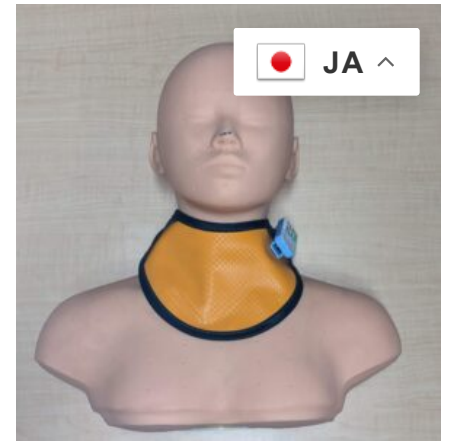


図 甲状腺等価線量あたりの年齢別甲状腺がん発生率リスク (ICRP 103) 男性では30代まで、女性では40代までと若年者ほどリスクが高い。



放射線防護用カラーの添付文書一覧 [[PMDAサイト](#)]

放射線防護用甲状腺防護具の添付文書一覧 [[PMDAサイト](#)]



放射線防護眼鏡

(PMDAの一般的名称「放射線防護用術者向け眼鏡」、「放射線防護用顔面防護具」、「放射線防護用ゴーグル」)

- 鉛ガラスや鉛アクリルをレンズとして放射線業務中の眼を防護する。
- 眼鏡でも前面のみ、側面も遮蔽するもの、パノラマタイプなど様々なレンズ形状がある。
- 鉛当量は0.07から0.75mmPbなど様々で、基本的に鉛当量が多いほど遮蔽能力が高いが、重量も重くなり、長時間かけていると耳や鼻に負担がかかる。(遮蔽能力は次項で紹介)
- 一般的な眼鏡と同様に使用するタイプと眼鏡の上に掛けるオーバーグラスタイプがある。

ヘッドギアと一体となった構造のものもある。

前面型
Front type



前面・側面型
Front and side type



オーバーグラス型
Over glas



ヘルメット型
Helmet type



放射線防護用術者向け眼鏡の添付文書一覧 [[PMDAサイト](#)]

放射線防護用顔面防護具の添付文書一覧 [[PMDAサイト](#)]

放射線防護用ゴーグルの添付文書一覧 [[PMDAサイト](#)]

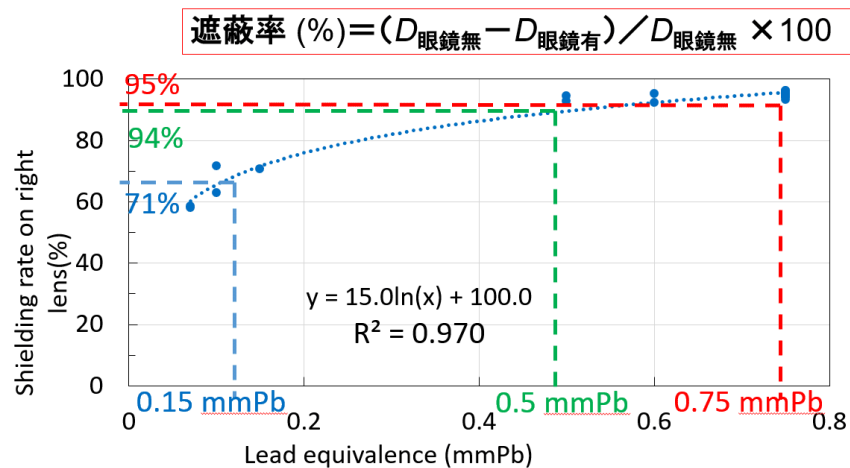
頭部ファントムの水晶体位置に金属マーカーを配置してX線画像を取得

- 散乱線源を把握し、隙間から水晶体へ届かないようにする
- 業務時間や手技内容から適切な放射線防護眼鏡を選択する



- 放射線防護眼鏡と水晶体の位置関係の評価

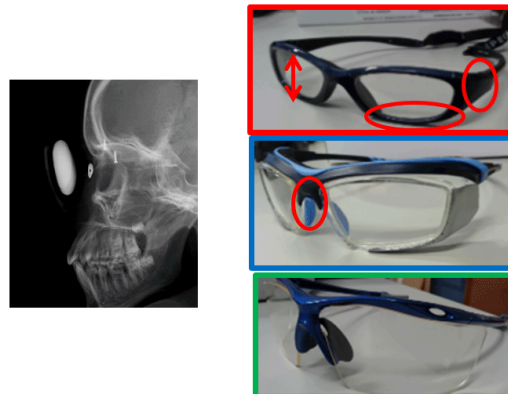
1. 正面から照射した際の鉛当量と遮蔽率の関係



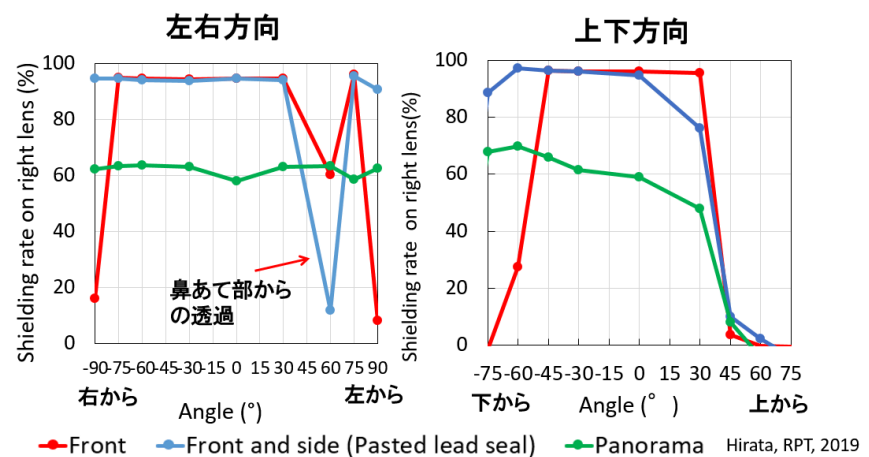
Hirata, Angular dependence of shielding effect of radiation protective eyewear for radiation protection of crystalline lens, RPT, 2019

- 放射線防護眼鏡使用時のポイント
- 種類により遮蔽できる範囲が異なる(サイドも遮蔽しているか)
- 遮蔽部分と顔(頬)との隙間から入射する散乱線に注意する

頭部ファントムの水晶体位置に金属マーカーを配置してX線画像を取得



入射方向別の水晶体線量遮蔽率



放射線防護用手袋

(PMDAの一般的名称「放射線防護用手袋」、「放射線防護用局所手防護具」)

- 滅菌されたもので天然ゴムやクロロプレングム等に鉛化合物を含有させた手袋が提供されている。
- 鉛当量は0.1mmPb程度（製品により異なる）
- 主な用途は照射野近くで手技をする術者の散乱線防護であり、照射野内に手袋をつけた手を入れてしまうと装置の出力が上昇し患者の被ばくが増えてしまうことから、一次X線（直接線）からの放射線防護目的には使用しない。



放射線防護用手袋の添付文書一覧 [\[PMDAサイト\]](#)

放射線防護用局所手防護具の添付文書一覧 [\[PMDAサイト\]](#) (CT生検時の補助具等)

放射線防護用帽子

(PMDAの一般的名称「放射線防護用帽子」)

- 鉛や無鉛の放射線防護材を含んだものでキャップタイプやハチマキタイプのものがあり、術者の脳の線量低減が期待できる。
- 散乱線の照射方向によっては効果を期待できないものもあり、放射線診療の場の状況に応じて使用する。

放射線防護用帽子の添付文書一覧 [\[PMDAサイト\]](#)

放射線防護板

(PMDAの一般的名称「放射線防護用移動式バリア」、「放射線防護用固定式バリア」)

手技中に術者の視界を遮ることなく鉛当量の高い遮蔽材として使用

- 水晶体線量は、X線管の角度、IVR術者の位置や照射野形状により影響を受ける。天井吊り下げ式放射線防護板は、術者の頭頸部の線量を2 - 10分の1に減らす有効なツールである。
- 防護板を効果的に使用するには、X線管と寝台が移動するときに、防護板を継続的に再配置する必要がある。したがって、防護板は原則として優れた放射線防護効果を提供するが、臨床処置で使用される全ての照射角度で効果的に展開することに限界もある。
- 天井吊り下げ式の他、キャスター式、衝立、カーテン式など様々な形式のもの販売されている。
- 素材も目的に応じて透明度の高い防護ガラス板、防護プラスチック板を使ったものの他、鉛やタングステン、マグネシウム、チタン、ビスマス、バリウム（無鉛）など様々な種類、鉛当量のものがある。



放射線防護用移動式バリアの添付文書一覧 [\[PMDAサイト\]](#)

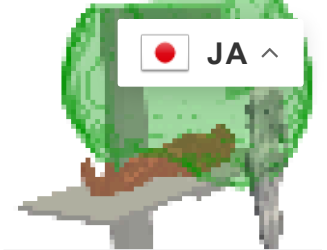
放射線防護用固定式バリアの添付文書一覧 [\[PMDAサイト\]](#)

放射線防護カーテン

- X線管や寝台のレールに取り付け、術者への散乱線を遮蔽する構造となっている。
- 散乱線源である患者近くでの遮蔽で室内全体に効果的な被ばく低減効果があるが、患者や装置との干渉に注意する必要がある。

放射線防護用カーテンの添付文書一覧 [\[PMDAサイト\]](#) (X線管や寝台に取り付ける)

放射線防護板の位置による散乱線分布の変化



■ 時間による放射線防護・照射時間の短縮

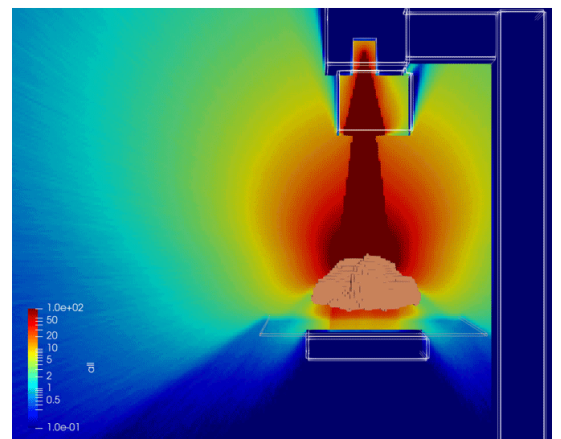
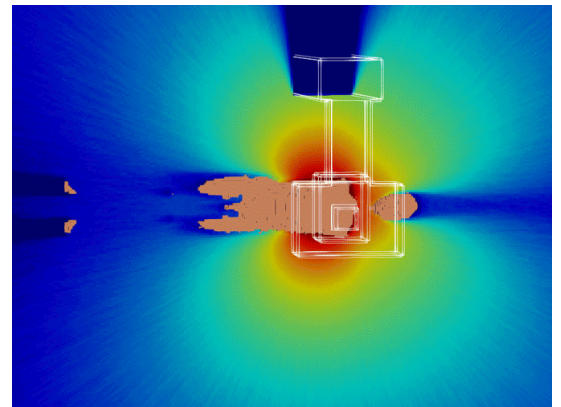
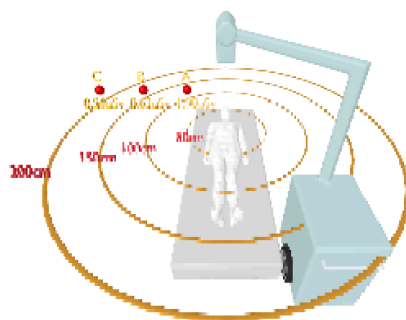
- スタッフの被ばく量は透視時間に比例する
- 透視時間を最小限に留める
- 透視画像を見ないときは透視を切る
- 近年の装置は透視を停止した際の画像が表示され続ける
- 透視のパルスレートを診療に支障のない範囲で下げる



<https://www.xray-art.com/fluoroscopy/>

■ 距離による放射線防護・散乱線分布の把握

- 放射線量は、線源からの距離の2乗に反比例
- スタッフへの主な散乱線源は患者
- 患者からの距離が50 cmから100 cmに離れることで被ばく量は約1/4に



照射条件による術者の被ばくの増減

- 術者はX線管に近づくと患者からの後方散乱が当たり、被ばくは増える。(IAEA動画教材)
- 照射野を絞るほど患者からの散乱線の発生量が少なくなり、被ばくは減る。(IAEA動画教材)
- 患者の体格が大きいと照射条件が上がり、被ばくは増える。(IAEA動画教材)
- 透視のフレームレートを下げるほど線量率が下がり、被ばくは減る。(IAEA動画教材)
- 患者と画像検出器を近づけるほど照射条件が下がり、被ばくは減る。(IAEA動画教材)
- 放射線防護手袋をつけて照射野内に手を入れると手袋内の手が見えるよう照射条件が上がり、患者と術者の被ばくが増える。(IAEA動画教材) (手袋は散乱線にのみ効果があり、照射野内に入れることは推奨されない。)

検査手技の観察による防護対策の振り返り学習

- 高被ばく放射線診療従事者への業務内容の把握と対応例として、医師、患者の了承を得た上で手技の一連の流れを監視カメラで録画し検証。

透視作業時の被ばくの要因について、指導医に対する新人医師の特徴

- 透視時間が長いように感じた。(透視時間が被ばく量に影響)
患者体位の調整に時間がかかっている。→体位変換時に一度を透視を切る。
カテーテル作業時に、透視を出してから開始している。
- 照射野が常に全開だった。→可能な範囲で絞る。
- 腹部圧迫時に顔が照射野付近まで近づいていた。
- 高被ばく者には今回のように動画を撮って検証し、改善策をフィードバックすることが有用
- 無線でリアルタイムに被ばくを表示する線量計システムにより、被ばく状況を把握する。
- 一定の線量率で被ばくするだけでなく、線源に近づくことで一気に増える可能性がある。

■ X線装置の管理

- [X線透視における線量・装置の管理](#) (pdfスライド)
- [AAPM Medical Physics Practice Guideline 12.a: Fluoroscopy dose management, Journal of Applied Clinical Medical Physics, 2022](#)
- [Estimation of patient skin dose in fluoroscopy: summary of a joint report by AAPM TG 357 and EFOMP, Med. Phys. 48, 2021](#)
- [The Report of AAPM TG 251: Survey of Pediatric Fluoroscopic Air Kerma Rate Values and Recommended Application of Results, AAPM 2022](#)

線量管理や装置の品質管理は、患者だけでなく術者の被ばく低減もつながる。

■ X線透視における従事者防護の要点

- [『X線透視における従事者防護の要点：10』IAEAポスター（日本語版）](#)

（日本医学放射線学会、日本インターベンショナルラジオロジー学会、医療放射線防護連絡協議会）

■ 医療従事者からよくある質問

- [透視におけるスタッフの線量と患者の線量の間に関係はありますか？](#)
- [透視検査中、X線管に対してどこに立っていればよいですか？](#)
- [透視における防護エプロンの効果は？](#)
- [透視作業では放射線防護手袋を使用する必要がありますか？](#)
- [後前方向、側面、斜入などの異なる照射角度は、患者の線量に影響しますか？](#)
- [X線透視はあまり使用しませんが、白内障になるリスクはありますか？](#)
- [透視装置を操作するために特別な放射線防護トレーニングが必要ですか？](#)
- [なぜ透視装置の定期的な品質管理\(QC\)が必要なのですか？](#)
- [放射線防護板の扱いに慣れておらず作業の邪魔になるのですが、使用する必要がありますか？](#)

(参考：[IAEA Radiation Protection of Patients\(RPOP\), Safety and interventional procedures](#))

放射線防護の
重要性

職業被ばくの
線量限度と実態

線量評価
・モニタリング

医療現場での放
射線防護の原則

部門別防護対策

アクション
チェックリスト

放射線防護教
材・関連資料

Contents

職業被ばく低減で医療現場
に求められること

一般撮影・ポータブル撮影
(病棟、手術室等)



立位胸部単純撮影時の散
乱線分布

X線透視（非血管系）



X線透視での放射線防護

X線透視室における散乱線
分布

術者位置(照射野中心から
患者横に50 cm)での線量
プロフィール

透視、非血管系IVRと手指
被ばく

内視鏡治療における補助
具（スコープホルダー）
による被ばく低減

モバイルCアーム装置の
360度映像

血管造影



散乱線の広がり

血管造影：防護板の位置
による遮蔽効果の違い

血管造影室における散乱
線分布例

CT検査



CT検査室の360度映像

部門別防護対策

職業被ばく低減で医療現場に求められること

線量限度を超過する可能性のある医療スタッフをいかになくすか

被ばく低減対策	放射線診療従事者	管理者
1. 放射線防護教育	防護法の理解	教材の作成と実施
2. 防護器具による対策	a.放射線防護具 (防護衣、眼鏡、 防護板)	防護具の配備
3. 装置、手技による対策	a.適切な装置の取 扱 b.適切な手技	装置管理
4. 線量モニタリ ング	a.適切な装置の取 扱 b.被ばく量の把握 c.水晶体線量計 d.リアルタイム線 量計	装着忘れの防止 自身の被ばく量の把握と 振り返り 使用 高被ばく手技の認識 監視、指導 限度を超過する可能性があれば介 入 配布基準 配備
5. 放射線管理体制の構築	規程等の遵守	委員会等の設置、規程・マニユア ル等の作成 放射線被ばく管理マネジメントシ ステムの導入

一般撮影・ポータブル撮影（病棟、手術室等）

＞ 散乱線分布

＞ CT検査室の3次元散乱線分布

＞ CT検査時の散乱線分布

＞ 核医学・PET検査



＞ 核医学検査ポジショニング・介助時の放射線防護

＞ ^{18}F 等 放射性医薬品投与室内の周辺線量当量分布

＞ 放射線治療



＞ 外部放射線治療

＞ 小線源治療

＞ 放射線管理室



＞ 放射線被ばく管理マネジメントシステムの導入

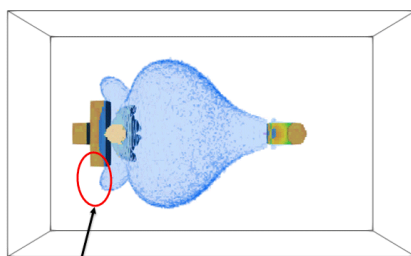
＞ リスク・コミュニケーション

Monte Carlo simulation for scatter dose in chest radiography

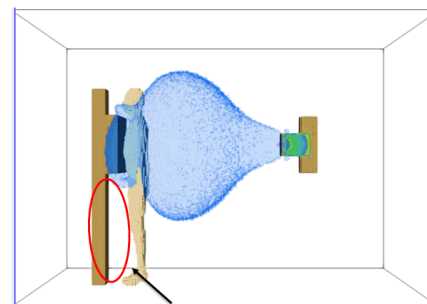
JA



立位胸部単純撮影時の散乱線分布



介助者の被ばくの少ない位置

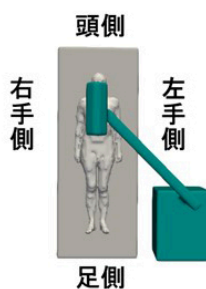


介助者の被ばくの少ない位置

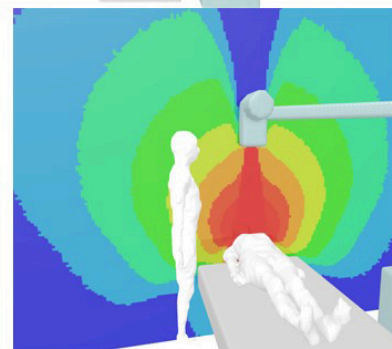
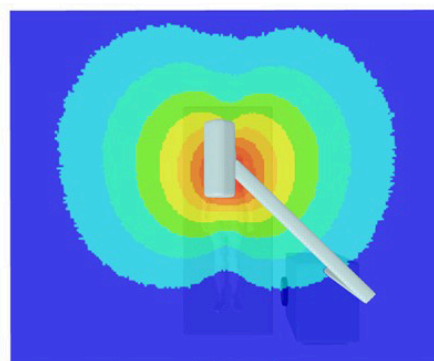
- 散乱線の広がりを意識する
- 被ばく量はX線の照射条件（管電圧、管電流、照射時間）に依存する

散乱線の広がり

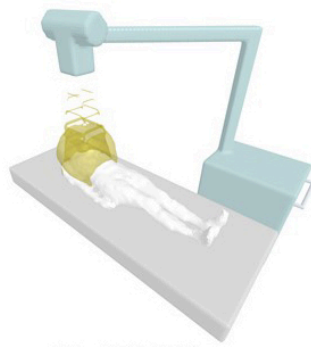
患者が散乱源および吸収体になる



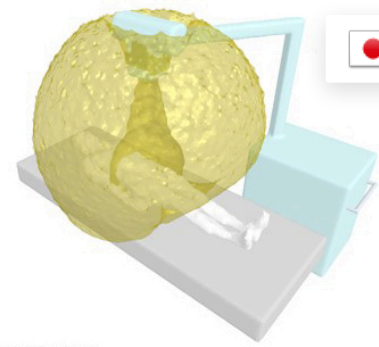
散乱線は患者から斜め後方に跳ね返る



照射条件、照射部位による線量は異なる



胸部撮影

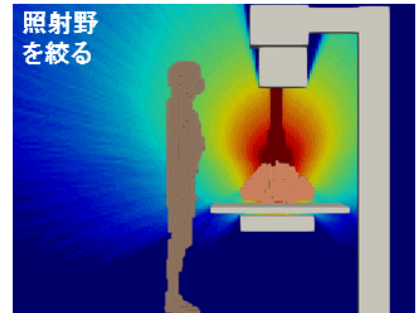
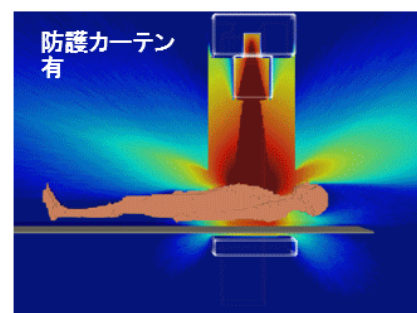
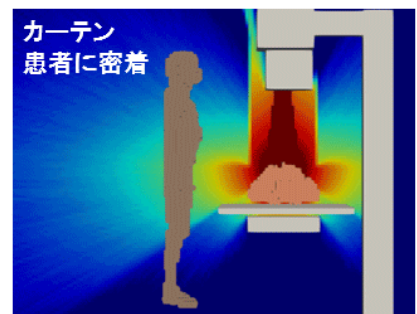
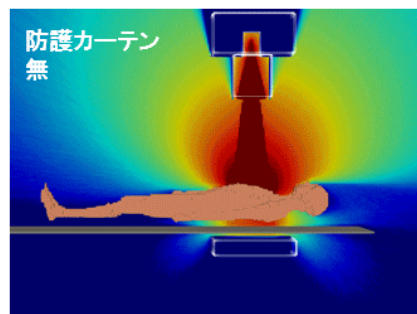
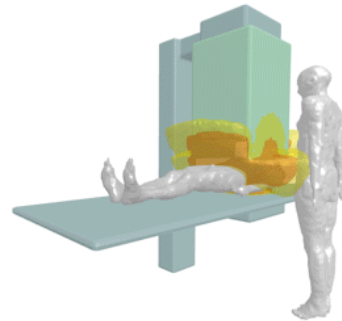


骨盤撮影
(管電流時間積[mAs]が胸部の
10倍だと、散乱線量も10倍)

X線透視（非血管系）

X線透視での放射線防護

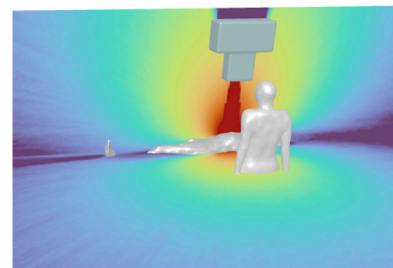
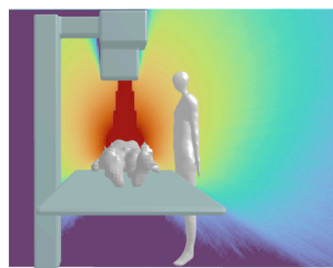
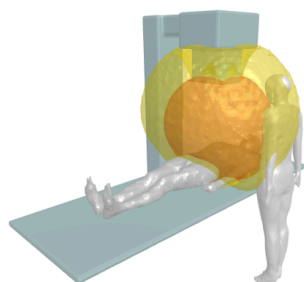
ERCPや非血管系IVR等では患者介助など散乱線源に近づくこともあり被ばくが多い



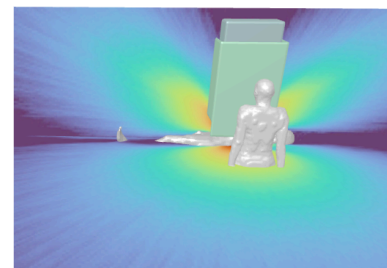
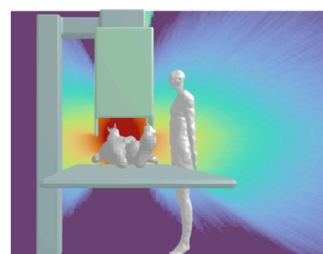
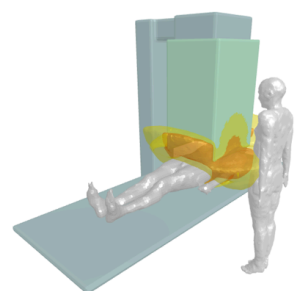


X線透視室における散乱線分布

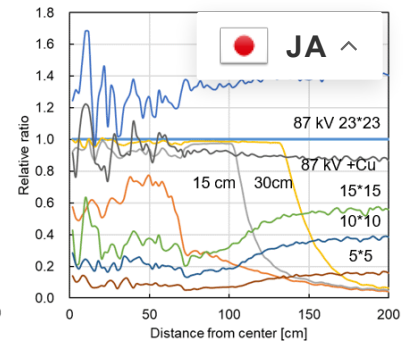
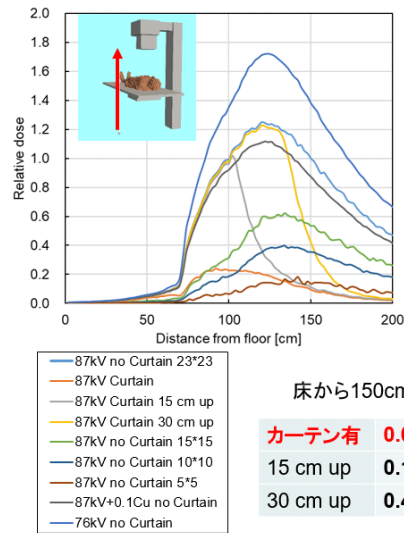
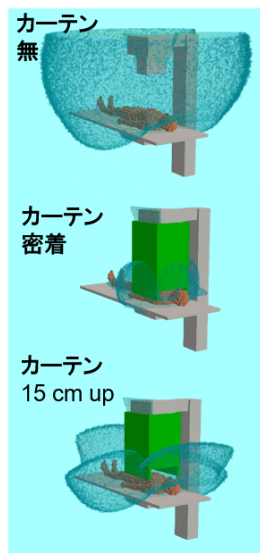
No protective devices



Using protective devices



術者位置(照射野中心から患者横に50 cm)での線量プロフィール



床から150cmでの87 kVカーテン無に対する線量比

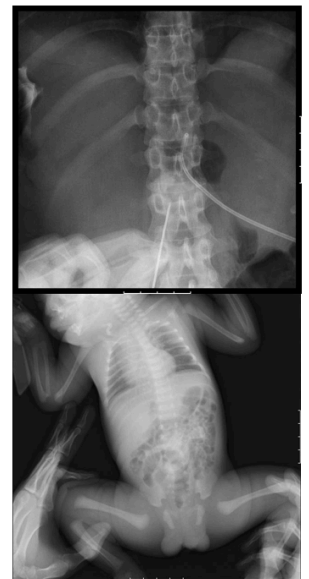
カーテン有	0.09	15*15	0.54	87 kV+ 0.1Cu	0.87
15 cm up	0.11	10*10	0.35	76 kV	1.38
30 cm up	0.42	5*5	0.14		

透視、非血管系IVRと手指被ばく

- 術者の手指は手技上、直接照射野内に入ってしまうことがある
- 照射野内に術者の手指が映ると、高線量の被ばくになる
- CTガイド下生検も同様

(対策)

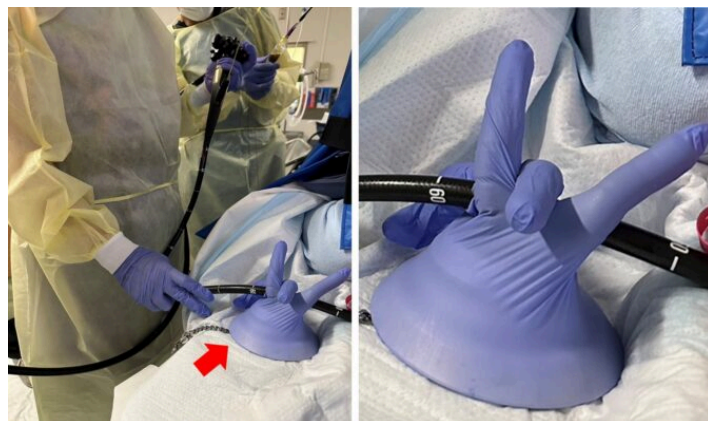
- 放射線防護手袋の着用
- 患者を抑える場合は、補助具を使用する
- 可能な範囲で照射野を絞る



内視鏡治療における補助具（スコープホルダー）による被ばく低減

内視鏡を使用した透視下治療において、患者に近接しての手技は高被ばくの要因となる。

下の写真のスコープホルダー（**矢印**）を用いることで、スコープの挿入部付近での介助が不要となり、散乱線源である患者と距離を確保できることから、介助者の被ばく低減につながる。



写真：藤森尚 助教（九州大学病院 肝臓・胆道・膵臓内科）提供

モバイルCアーム装置の360度映像

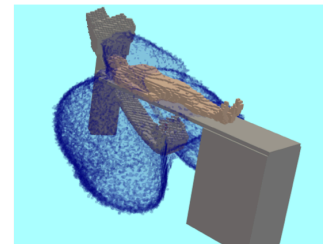
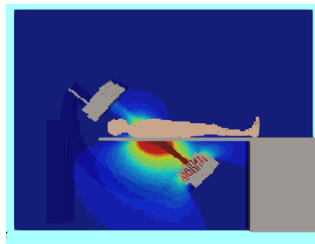
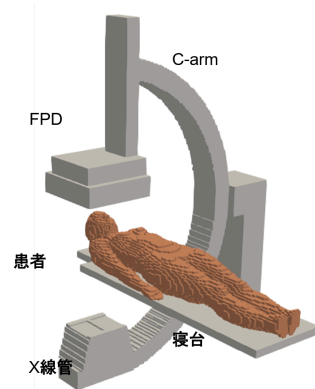
[静止画](#)、[ポイントクラウドデータ](#)、[動画](#)

 **JA** [へ](#)



血管造影

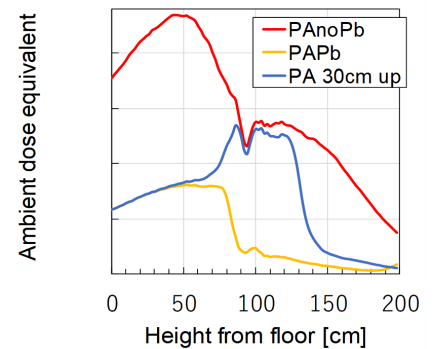
散乱線の広がり

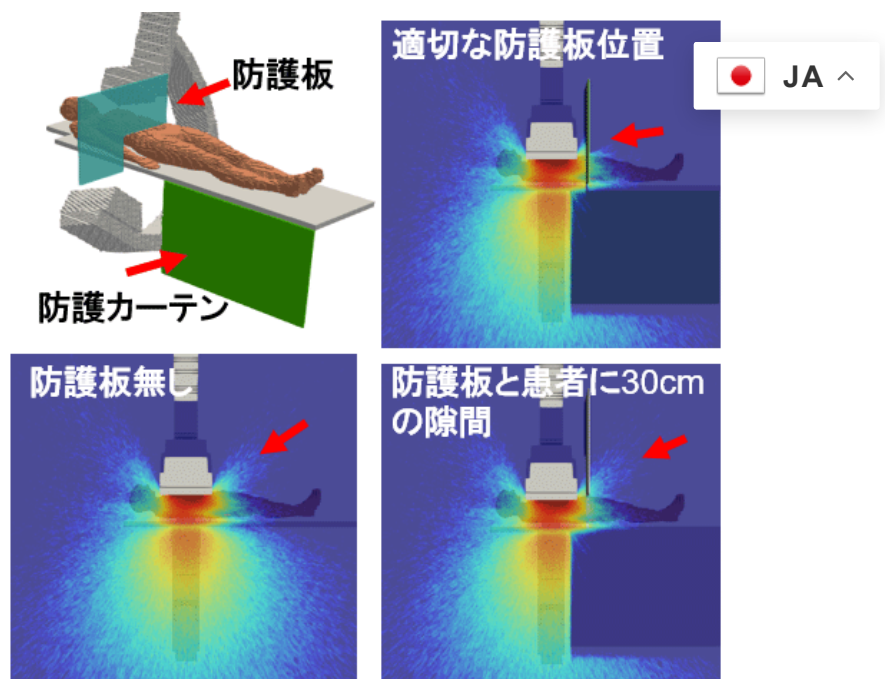


血管造影：防護板の位置による遮蔽効果の違い

(A) 防護板が患者に接近し、有効に散乱線が遮蔽されている

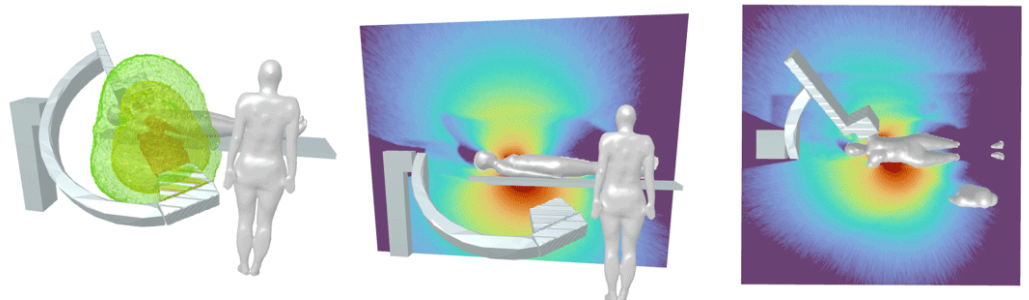
(B) 防護板と操作者の間の距離が大きいため、散乱線が様々な方向から到達し、防護効果が低くなる



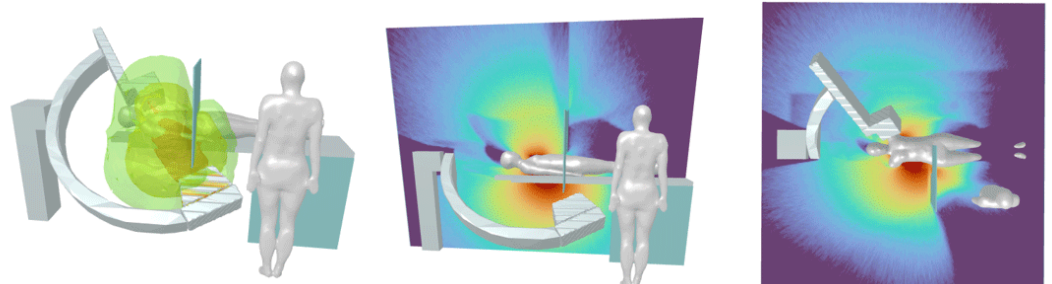


血管造影室における散乱線分布例

No protective devices



Using protective devices



CT検査

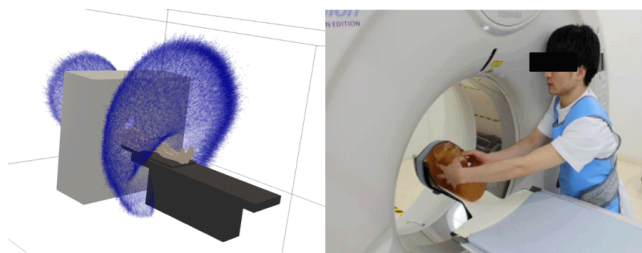
CT検査室の360度映像

[静止画](#)、[ポイントクラウドデータ](#)、[動画1](#)、[動画2](#)



散乱線分布

- CTではX線の出力が高く、数秒の介助でも介助者の被ばくは高くなる
- 散乱線源は患者で、防護具の使用と少しでも距離を取ることが被ばく低減につながる



頭部介助時の低減例

- スキャン方法を工夫することで低減可能（ただし画質とのトレードオフ）
- 解除位置の工夫により大幅な低減が可能

測定位置	helical		volume					
	ガントリー中心から50 cm		ガントリー中心から50 cm		ガントリー中心から62 cm		ガントリー密着	
	左眼	右眼	左眼	右眼	左眼	右眼	左眼	右眼
1cm線量当量(μSv)	598	612	245	256	137	178	97	42
低減効果(%)	—	—	59.0	58.2	77.1	70.9	83.8	93.1

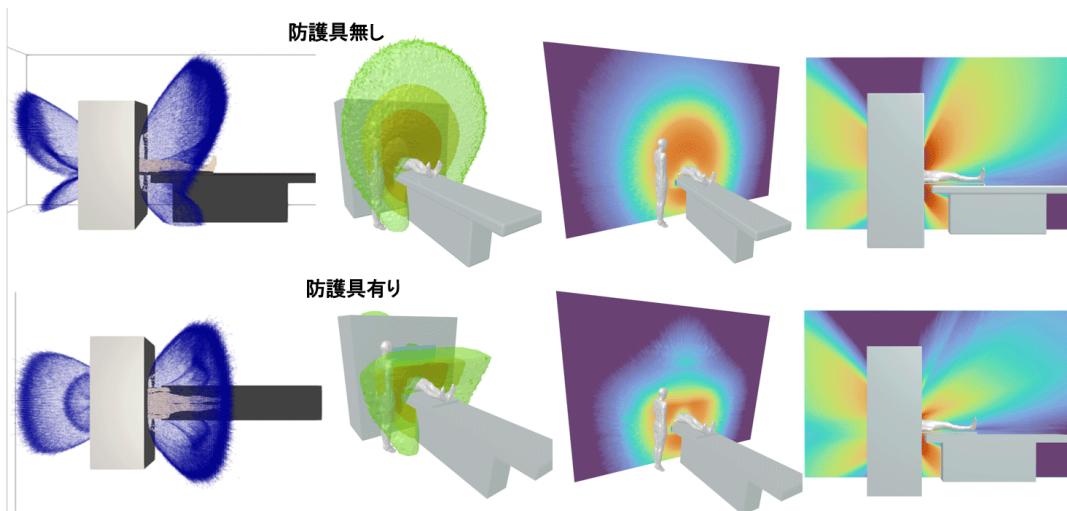
宮島,日本放射線技術学会雑誌, 2018

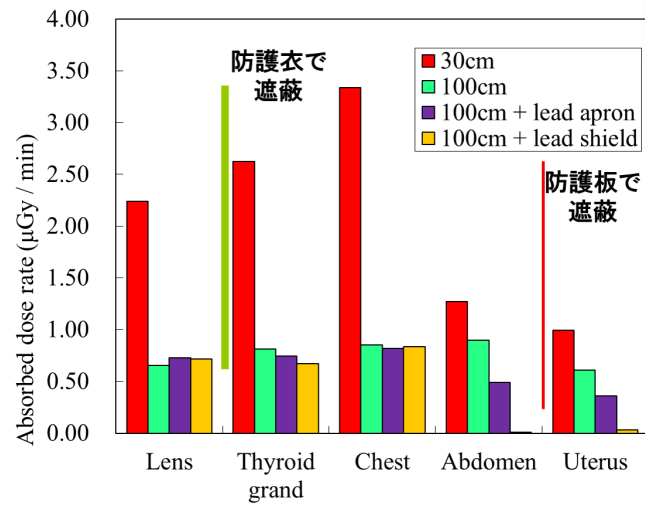
CT検査室の3次元散乱線分布

モンテカルロシミュレーションを使用 測定値と計算値の差は平均約10%（n=110）

Fujibuchi, Radiation protection education using virtual reality by visualization of scatter distribution in radiological examination, JRP, 2021

CT検査時の散乱線分布





- 距離による防護は有効
- ガンマ線はエネルギーが高く、防護衣による遮蔽が困難



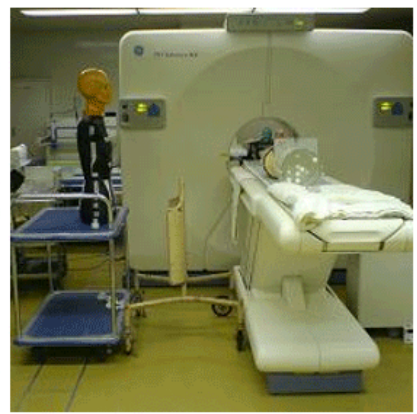
1)線源から30 cm



2)線源から100 cm



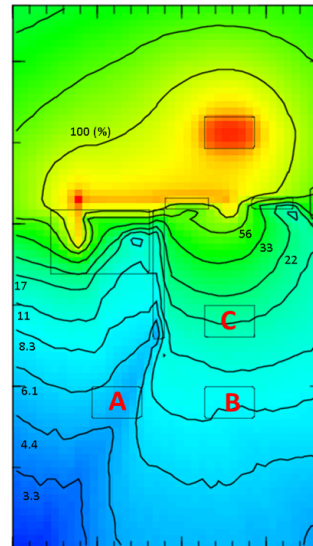
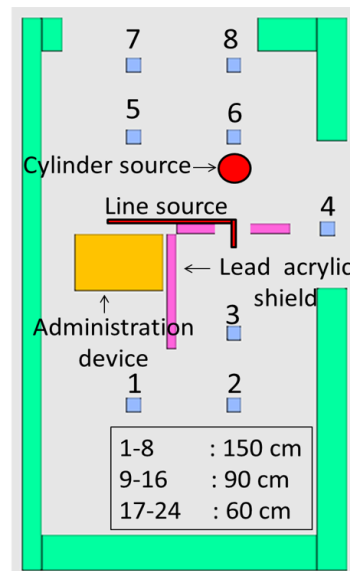
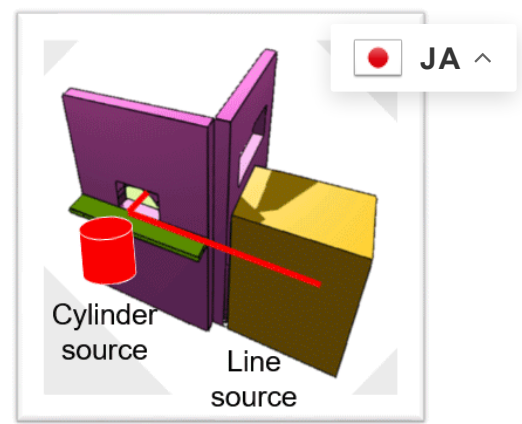
3)線源から100 cm
+プロテクタ着用



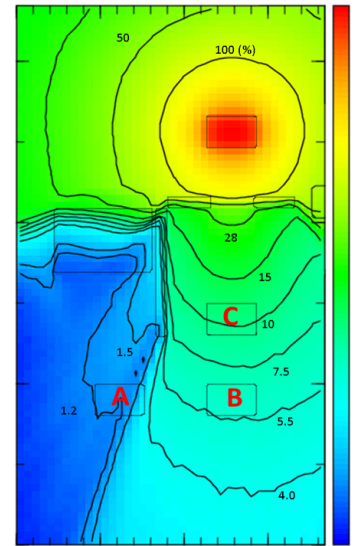
4)線源から100 cm
+3 cm鉛防護板

¹⁸F等 放射性医薬品投与室内の周辺線量当量分布

- 防護板があっても、患者の腕を出す穴からガンマ線が漏洩するため、可能な範囲で距離をとり観察する



A / C: 31%、B / C: 52%



A / C: 13%、B / C: 58%

[Nagamine, Radiol Phys Technol., 2017](#)

放射線治療

外部放射線治療

- 適切に遮蔽された施設では被曝線量は最小限（またはゼロ）である。高エネルギー放射線を使用した場合、照射直後は装置のターゲット付近が放射化しており、数100 $\mu\text{Sv/h}$ となることもある。

（参考資料）[放射線治療装置の放射化物に関する疑問にお答えします -放射線治療装置の点検・更新・撤去に携わる方へ-](#)

小線源治療

- 小線源治療部門では、スタッフによる放射線被ばくが発生する（例：シード、針、ワイヤ、管等の密封線源の装填、関連する透視検査など）積極的に管理しなければならない被ばく線量の可能性がある。

（参考：[Publication 139 Occupational Radiological Protection in Interventional Procedures \(2018\)](#)）（要旨）

放射線被ばく管理マネジメントシステムの導入

- 放射線被ばく管理マネジメントシステムは、PDCAサイクルを通じて安全衛生管理を自主的・継続的に実施する仕組みである労働安全衛生マネジメントシステムを放射線被ばく管理に応用したもので、放射線業務従事者等の被ばく低減を目的に、組織トップによる基本方針の表明、リスクアセスメント、目標の設定、計画の作成・実施、評価・改善を行う。
- 厚生労働省委託事業として、「[放射線被ばく管理に関する労働衛生マネジメントシステム導入支援事業](#)」が実施されている。

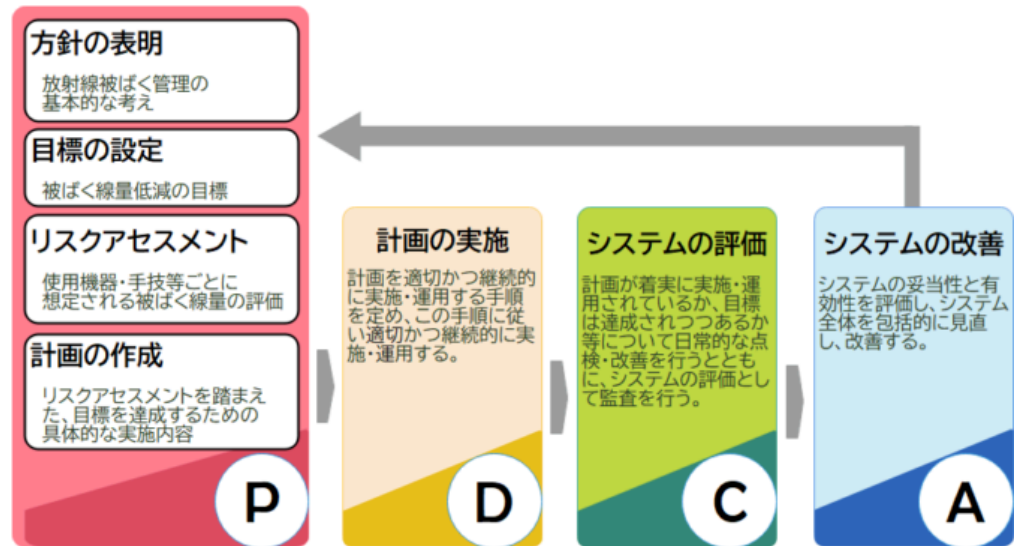


図 放射線被ばく管理MSとは「放射線被ばく管理に関する労働衛生マネジメントシステム導入支援事業」HPより

- 令和3年度労災疾病臨床研究事業費補助金「[放射線防護マネジメントシステムの適用と課題解決に関する研究](#)」において導入に関する研究が実施されている。

リスク・コミュニケーション

- 放射線防護方法や被ばくについて不安がある医療スタッフに対して、リスク・コミュニケーションの手法を用い、不安の要因を探り、解決策を共考する。



放射線防護の
重要性

職業被ばくの
線量限度と実態

線量評価
・モニタリング

医療現場での放
射線防護の原則

部門別防護対策

アクション
チェックリスト

放射線防護教
材・関連資料

Contents

[アクションチェックリスト](#)

[一般撮影](#)

[X線透視](#)

[血管造影](#)

[CT検査](#)

[核医学検査](#)

[放射線治療](#)

アクションチェックリスト

本研究事業は、職業被ばく低減対策のためにアクションチェックリスト及び放射線防護教材内容の充実させることを目的として実施しております。

研究対象者で[研究同意書](#)をご確認の上ご同意いただける場合は、下記の手順でご協力をお願いいたします。

1. アクションチェックリストおよび放射線防護教材をご確認いただき、チェックリストのYes, Noにチェックしてください。

その際、不明な項目については、チェックリスト横のLinkから解説資料にアクセスしご確認ください。

2. 全ての項目をチェック後、下方のお名前欄に氏名をご入力いただき、送信ボタンを押してください。

3. チェックリストの送信が完了しましたら、[Webアンケート](#)にご回答ください。

■ アクションチェックリスト

アクションチェックリストとは・・・実施すべきアクション（取り組み）をチェックリスト形式で確認し、取り組みへの気付きを促し、行動を起こすために開発された現場改善のための手法です。

YesまたはNoにチェックを付けて、送信ボタンを押してください。

研究に同意いただける試験対象者の方は、アンケート（[Link](#)）へのご協力をお願いいたします。

お問合せご相談がある方はお名前とご連絡先メールアドレスのご記入をお願い致します。

[一般撮影](#)

[X線透視](#)

[血管造影](#)

[CT検査](#)

[核医学検査](#)

[放射線治療](#)

■ 集計結果

- [第1回集計結果](#)

放射線防護の
重要性職業被ばくの
線量限度と実態線量評価
・モニタリング医療現場での放
射線防護の原則

部門別防護対策

アクション
チェックリスト放射線防護教
材・関連資料

Contents

[アクションチェックリスト](#)[一般撮影](#)[X線透視](#)[血管造影](#)[CT検査](#)[核医学検査](#)[放射線治療](#)

アクションチェックリスト（一般撮影）

アクションチェックリスト ver.2022.12

*X線撮影室の他、病棟、手術室の撮影を含む

診療前の準備			Yes	No	参考
放射線防護具	1	放射線防護エプロンを着用している	☐	☐	Link
	2	放射線防護眼鏡を着用している	☐	☐	Link
	3	ネックガードを着用している	☐	☐	Link
個人線量計	4	体幹部（胸部または腹部）に線量計をつけている	☐	☐	Link
	5	（防護エプロンを着用する場合） 体幹部用の線量計をエプロンの内側に着用している	☐	☐	Link
	6	（防護エプロンを着用する場合） 頸部の防護具の外側に線量計をつけている	☐	☐	Link
	7	（指先が照射野に近い場所で作業する場合） 指輪型の線量計をつけている	☐	☐	Link
	8	電子式線量計をつけている	☐	☐	Link
診療中の防護			Yes	No	参考
放射線防護具 （遮蔽による防護）	9	天吊りの放射線防護板を使用している	☐	☐	Link
	10	天吊り防護板を術者に近づけ患者と隙間のないよう 配置している	☐	☐	Link
	11	放射線防護衝立を使用している	☐	☐	Link
	12	放射線防護カーテンを使用している	☐	☐	Link
	13	その他の放射線防護具を使用している	☐	☐	Link
手技中の位置 （距離による防護）	14	X線管にできるだけ近づかないようにしている	☐	☐	Link
	15	患者からの散乱線の広がりを意識し、 可能な範囲で近づかないようにしている	☐	☐	Link
	16	小児の介助時に固定具を使用し、直接手で保持しない ようにしている	☐	☐	Link

	17	照射野に手を入れない	☐	☐	Link
照射条件	18	DRLを参考に照射条件を最適化している	☐	☐	Link
	19	照射野を可能な範囲で絞っている	☐	☐	Link
	20	患者と画像検出器をできるだけ近づけている	☐	☐	Link
	21	撮影枚数を可能な範囲で少なくしている	☐	☐	Link



放射線影響の理解			Yes	No	参考
被ばくリスク	22	自身の毎月の被ばく量を把握している	☐	☐	Link
	23	法令で定められた線量限度を知っている	☐	☐	Link
	24	水晶体被ばくによる白内障のリスクがあることを知っている	☐	☐	Link
	25	被ばくによる発がんリスクがあることを知っている	☐	☐	Link
	26	被ばくによる皮膚障害リスクがあることを知っている	☐	☐	Link
	27	被ばくによる循環器障害リスクがあることを知っている	☐	☐	Link

コメント・相談のある方は以下を記入してください	
お名前（必須）	
メール（任意）	
本文（任意）	

送信

*送信後、こちらから[Webアンケート](#)にご回答をお願いいたします。

放射線防護の
重要性職業被ばくの
線量限度と実態線量評価
・モニタリング医療現場での放
射線防護の原則

部門別防護対策

アクション
チェックリスト放射線防護教
材・関連資料

コンテンツ

[アクションチェックリスト](#)[一般撮影](#)[X線透視](#)[血管造影検査](#)[CT検査](#)[核医学検査](#)[放射線治療](#)

アクションチェックリスト(放射線治療)

アクションチェックリスト ver.2023.6

*外部放射線治療、小線源治療(線源挿入時の透視)を含む

診療前の準備			はい	いいえ	参考
放射線防護具	1	放射線防護エプロンを着用している	☐	☐	リンク
	2	放射線防護眼鏡を着用している	☐	☐	リンク
	3	ネックガードを着用している	☐	☐	リンク
個人線量計	4	体幹部（胸部または腹部）に線量計をつけている	☐	☐	リンク
	5	（防護エプロンを着用する場合） 体幹部用の線量計をエプロンの内側に着用している	☐	☐	リンク
	6	（防護エプロンを着用する場合） 頸部の防護具の外側に線量計をつけている	☐	☐	リンク
	7	（指先が照射野に近い場所で作業する場合） 指輪型の線量計をつけている	☐	☐	リンク
	8	電子式線量計をつけている	☐	☐	リンク
診療中の防護			はい	いいえ	参考
放射線防護具 （遮蔽による防護）	9	天吊りの放射線防護板を使用している	☐	☐	リンク
	10	天吊り防護板を術者に近づけ患者と隙間のないよう 配置している	☐	☐	リンク
	11	放射線防護衝立を使用している	☐	☐	リンク
	12	その他の放射線防護具を使用している	☐	☐	リンク
照射時間 （時間による防護）	13	RI線源に接近する時間を最小限にしている	☐	☐	リンク
	14	透視画面を見ない際はX線を出さないようにしている	☐	☐	リンク
	15	総透視時間を意識している	☐	☐	リンク
手技中の位置	16	X線管、RI線源にできるだけ近づかないようにしてい	☐	☐	リンク

(距離による防護)	る			
	17 患者からの散乱線の広がりを意識し、できるだけ近づかないようにしている	○		
照射条件	18 可能な範囲で照射野を絞っている	○	○	リンク
	19 患者と画像検出器をできるだけ近づけている	○	○	リンク
	20 透視のパルスレートを可能な範囲で小さくしている	○	○	リンク
	21 撮影枚数を可能な範囲で少なくしている	○	○	リンク
	22 照射野に手を入れない	○	○	リンク



放射線影響の理解			はい	いいえ	参考
被ばくリスク	23	自身の毎月の被ばく量を把握している	○	○	リンク
	24	法令で定められた線量限度を知っている	○	○	リンク
	25	水晶体被ばくによる白内障のリスクがあることを知っている	○	○	リンク
	26	被ばくによる発がんリスクがあることを知っている	○	○	リンク
	27	被ばくによる皮膚障害リスクがあることを知っている	○	○	リンク

コメント・相談のある方は以下を記入してください	
お名前（必須）	
メール（任意）	
この記事（オプション）	

送信

*送信後、こちらから[Webアンケート](#)にご回答をお願いいたします。

放射線防護の
重要性職業被ばくの
線量限度と実態線量評価
・モニタリング医療現場での放
射線防護の原則

部門別防護対策

アクション
チェックリスト放射線防護教
材・関連資料WebVR/AR散乱線
可視化教材ARX線室散乱線可
視化アプリ
X-SERVE

アクションチェックリスト 4.6

*SPECT-CT、PET-CT
可視化ソフトウェ
ア ParaView

関連資料

リンク集

[Link](#)[Link](#)[Link](#)[Link](#)[Link](#)[Link](#)[Link](#)

Contents

[アクションチェックリスト](#)[一般撮影](#)[X線透視](#)[血管造影](#)[CT検査](#)[核医学検査](#)[放射線治療](#)

アクションチェックリスト(核医学検査)

診療前の準備			Yes		
放射線防護具	1	放射線防護エプロンを着用している	☐		
	2	放射線防護眼鏡を着用している	☐		
	3	ネックガードを着用している	☐	☐	Link
個人線量計	4	体幹部（胸部または腹部）に線量計をつけている	☐	☐	Link
	5	（防護エプロンを着用する場合） 体幹部用の線量計をエプロンの内側に着用している	☐	☐	Link
	6	（防護エプロンを着用する場合） 頸部の防護具の外側に線量計をつけている	☐	☐	Link
	7	（指先が照射野に近い場所で作業する場合） 指輪型の線量計をつけている	☐	☐	Link
	8	電子式線量計をつけている	☐	☐	Link

診療中の防護			Yes	No	参考
放射線防護具 （遮蔽による防護）	9	天吊りの放射線防護板を使用している	☐	☐	Link
	10	天吊り防護板を術者に近づけ患者と隙間のないよう 配置している	☐	☐	Link
	11	放射線防護衝立を使用している	☐	☐	Link
	12	RI投与時、自動投与装置を使用している	☐	☐	Link
	13	手動による投与時、シリンジシールドを使用してい る	☐	☐	Link
	14	β線源等、線種に適した遮蔽体を使用している	☐	☐	Link
	15	その他の放射線防護具を使用している	☐	☐	Link
照射時間 （時間による防護）	16	RI線源に接近する時間を最小限にしている	☐	☐	Link

	17	RI投与後の患者に接近する時間を最小限にしている	☐	☐	Link
手技中の位置 (距離による防護)	18	RI投与後の患者に、必要以上に接近しないようにしている	☐	☐	Link
	19	CTでの介助時、患者からの散乱線を意識し、できるだけ近づかないようにしている	☐	☐	Link
照射条件、その他	20	投与量、CT時の照射条件を最適化している	☐	☐	Link
	21	RI調整時は、ドラフト内で作業している	☐	☐	Link
	22	CT介助時、照射野に手を入れない	☐	☐	Link



放射線影響の理解			Yes	No	参考
被ばくのリスク	23	自身の毎月の被ばく量を把握している	☐	☐	Link
	24	法令で定められた線量限度を知っている	☐	☐	Link
	25	水晶体被ばくによる白内障のリスクがあることを知っている	☐	☐	Link
	26	被ばくによる発がんリスクがあることを知っている	☐	☐	Link
	27	被ばくによる皮膚障害リスクがあることを知っている	☐	☐	Link
	28	被ばくによる循環器障害リスクがあることを知っている	☐	☐	Link

コメント・相談のある方は以下を記入してください	
お名前（必須）	
メール（任意）	
本文（任意）	

送信

*送信後、こちらから[Webアンケート](#)にご回答をお願いいたします。

放射線防護の
重要性職業被ばくの
線量限度と実態線量評価
・モニタリング医療現場での放
射線防護の原則

部門別防護対策

アクション
チェックリスト放射線防護教
材・関連資料

Contents

[アクションチェックリスト](#)[一般撮影](#)[X線透視](#)[血管造影](#)[CT検査](#)[核医学検査](#)[放射線治療](#)

アクションチェックリスト(CT検査)

一般撮影

X線透視

アクションチェックリスト ver.2023.6

血管造影

*CT透視を含む

診療前の準備			Yes	No	参考
放射線防護具	1	放射線防護エプロンを着用している	☐	☐	Link
	2	放射線防護眼鏡を着用している	☐	☐	Link
	3	ネックガードを着用している	☐	☐	Link
個人線量計	4	体幹部（胸部または腹部）に線量計をつけ	☐	☐	Link
	5	（防護エプロンを着用する場合） 体幹部用の線量計をエプロンの内側に着用している	☐	☐	Link
	6	（防護エプロンを着用する場合） 頸部の防護具の外側に線量計をつけている	☐	☐	Link
	7	（指先が照射野に近い場所で作業する場合） 指輪型の線量計をつけている	☐	☐	Link
	8	電子式線量計をつけている	☐	☐	Link

診療中の防護			Yes	No	参考
放射線防護具 （遮蔽による防護）	9	天吊りの放射線防護板を使用している	☐	☐	Link
	10	天吊り防護板を術者に近づけ患者と隙間のないよう 配置している	☐	☐	Link
	11	放射線防護衝立を使用している	☐	☐	Link
	12	放射線防護カーテンを使用している	☐	☐	Link
	13	その他の放射線防護具を使用している	☐	☐	Link
照射時間 （時間による防護）	14	透視画面を見ない際はX線を出さないようにしている	☐	☐	Link
	15	総透視時間を意識している	☐	☐	Link
手技中の位置 （距離による防護）	16	X線管にできるだけ近づかないようにしている	☐	☐	Link

	17	患者からの散乱線の広がり意識し、できるだけ近づかないようにしている	☐	☐	JA
照射条件	18	DRLを参考に照射条件を最適化している	☐	☐	Link
	19	透視の照射条件を可能な範囲で小さくしている	☐	☐	Link
	20	可能な範囲で少なくしている	☐	☐	Link
	21	介助中や透視中に照射野に手を入れない	☐	☐	Link

放射線影響の理解			Yes	No	参考
被ばくリスク	22	自身の毎月の被ばく量を把握している	☐	☐	Link
	23	法令で定められた線量限度を知っている	☐	☐	Link
	24	水晶体被ばくによる白内障のリスクがあることを知っている	☐	☐	Link
	25	被ばくによる発がんリスクがあることを知っている	☐	☐	Link
	26	被ばくによる皮膚障害リスクがあることを知っている	☐	☐	Link

コメント・相談のある方は以下を記入してください

お名前（必須）	
メール（任意）	
本文（任意）	

送信

*送信後、こちらから[Webアンケート](#)にご回答をお願いいたします。

放射線防護の
重要性職業被ばくの
線量限度と実態線量評価
・モニタリング医療現場での放
射線防護の原則

部門別防護対策

アクション
チェックリスト放射線防護教
材・関連資料

Contents

[アクションチェックリスト](#)[一般撮影](#)[X線透視](#)[血管造影](#)[CT検査](#)[核医学検査](#)[放射線治療](#)

アクションチェックリスト (血管造影)

アクションチェックリスト ver.2023.6

診療前の準備			Yes	No	参考
放射線防護具	1	放射線防護エプロンを着用している	☐	☐	Link
	2	放射線防護眼鏡を着用している	☐	☐	Link
	3	ネックガードを着用している	☐	☐	Link
個人線量計	4	体幹部（胸部または腹部）に線量計をつけている	☐	☐	Link
	5	（防護エプロンを着用する場合） 体幹部用の線量計をエプロンの内側に着用している	☐	☐	Link
	6	（防護エプロンを着用する場合） 頸部の防護具の外側に線量計をつけている	☐	☐	Link
	7	（指先が照射野に近い場所で作業する場合） 指輪型の線量計をつけている	☐	☐	Link
	8	電子式線量計をつけている	☐	☐	Link
診療中の防護			Yes	No	参考
放射線防護具 （遮蔽による防護）	9	天吊りの放射線防護板を使用している	☐	☐	Link
	10	天吊り防護板を術者に近づけ患者と隙間のないよう 配置している	☐	☐	Link
	11	放射線防護衝立を使用している	☐	☐	Link
	12	放射線防護カーテンを使用している	☐	☐	Link
	13	その他の放射線防護具を使用している	☐	☐	Link
照射時間 （時間による防護）	14	透視画面を見ない際はX線を出さないようにしている	☐	☐	Link
	15	総透視時間を意識している	☐	☐	Link
手技中の位置 （距離による防護）	16	X線管にできるだけ近づかないようにしている	☐	☐	Link
	17	患者からの散乱線の広がりを意識し、できるだけ近 づかないようにしている	☐	☐	Link

照射条件	18	DRLを参考に照射条件を最適化している	☐	☐	Link
	19	可能な範囲で照射野を絞っている	☐	☐	Link
	20	患者と画像検出器をできるだけ近づけている	☐	☐	Link
	21	透視のパルスレートを可能な範囲で小さくしている	☐	☐	Link
	22	撮影枚数を可能な範囲で少なくしている	☐	☐	Link
	23	照射野に手を入れない	☐	☐	Link



放射線影響の理解			Yes	No	参考
被ばくリスク	24	自身の毎月の被ばく量を把握している	☐	☐	Link
	25	法令で定められた線量限度を知っている	☐	☐	Link
	26	水晶体被ばくによる白内障のリスクがあることを知っている	☐	☐	Link
	27	被ばくによる発がんリスクがあることを知っている	☐	☐	Link
	28	被ばくによる皮膚障害リスクがあることを知っている	☐	☐	Link
	29	被ばくによる循環器障害リスクがあることを知っている	☐	☐	Link

コメント・相談のある方は以下を記入してください	
お名前（必須）	
メール（任意）	
本文（任意）	

送信

*送信後、こちらから[Webアンケート](#)にご回答をお願いいたします。

放射線防護の
重要性職業被ばくの
線量限度と実態線量評価
・モニタリング医療現場での放
射線防護の原則

部門別防護対策

アクション
チェックリスト放射線防護教
材・関連資料

Contents

[アクションチェックリスト](#)[一般撮影](#)[X線透視](#)[血管造影](#)[CT検査](#)[核医学検査](#)[放射線治療](#)

アクションチェックリスト（X線透視）

アクションチェックリスト ver.2023.6

診療前の準備			Yes	No	参考
放射線防護具	1	放射線防護エプロンを着用している	☐	☐	Link
	2	放射線防護眼鏡を着用している	☐	☐	Link
	3	ネックガードを着用している	☐	☐	Link
個人線量計	4	体幹部（胸部または腹部）に線量計をつけている	☐	☐	Link
	5	（防護エプロンを着用する場合） 体幹部用の線量計をエプロンの内側に着用している	☐	☐	Link
	6	（防護エプロンを着用する場合） 頸部の防護具の外側に線量計をつけている	☐	☐	Link
	7	（指先が照射野に近い場所で作業する場合） 指輪型の線量計をつけている	☐	☐	Link
	8	電子式線量計をつけている	☐	☐	Link
診療中の防護			Yes	No	参考
放射線防護具 （遮蔽による防護）	9	天吊りの放射線防護板を使用している	☐	☐	Link
	10	天吊り防護板を術者に近づけ患者と隙間のないよう 配置している	☐	☐	Link
	11	放射線防護衝立を使用している	☐	☐	Link
	12	放射線防護カーテンを使用している	☐	☐	Link
	13	その他の放射線防護具を使用している	☐	☐	Link
照射時間 （時間による防護）	14	透視画面を見ない際はX線を出さないようにしている	☐	☐	Link
	15	総透視時間を意識している	☐	☐	Link
手技中の位置 （距離による防護）	16	X線管にできるだけ近づかないようにしている	☐	☐	Link
	17	患者からの散乱線の広がりを意識し、 できるだけ近づかないようにしている	☐	☐	Link

照射条件	18	DRLを参考に照射条件を最適化している	☐	☐	Link
	19	可能な範囲で照射野を絞っている	☐	☐	Link
	20	患者と画像検出器をできるだけ近づけている	☐	☐	Link
	21	透視のパルスレートを可能な範囲で小さくしている	☐	☐	Link
	22	撮影枚数を可能な範囲で少なくしている	☐	☐	Link
	23	照射野に手を入れない	☐	☐	Link



放射線影響の理解			Yes	No	参考
被ばくリスク	24	自身の毎月の被ばく量を把握している	☐	☐	Link
	25	法令で定められた線量限度を知っている	☐	☐	Link
	26	水晶体被ばくによる白内障のリスクがあることを知っている	☐	☐	Link
	27	被ばくによる発がんリスクがあることを知っている	☐	☐	Link
	28	被ばくによる皮膚障害リスクがあることを知っている	☐	☐	Link
	29	被ばくによる循環器障害リスクがあることを知っている	☐	☐	Link

コメント・相談のある方は以下を記入してください	
お名前（必須）	
メール（任意）	
本文（任意）	

送信

*送信後、こちらから[Webアンケート](#)にご回答をお願いいたします。

放射線防護の
重要性

職業被ばくの
線量限度と実態

線量評価
・モニタリング

医療現場での放
射線防護の原則

部門別防護対策

アクション
チェックリスト

放射線防護教
材・関連資料

Contents

WebVR/AR散乱線可視化教
材



WebVR教材動画例

実習の流れ

実習項目

教材を使用した感想と要
望

ARX線室散乱線可視化アプ
リ

X-SERVE



X線室散乱線可視化アプリ
(X-ray examination
ScatterEd Radiation
VisualizE application)

拡張現実を利用した散乱
線分布の可視化

可視化ソフト ウェア
ParaView



ParaView Glance

ParaView Lite

X線装置及び散乱線分布の
3Dデータを基にした3Dプ
リント出力例

関連資料



眼の水晶体の等価線量の
算定方法を決定するた
めのフロー図

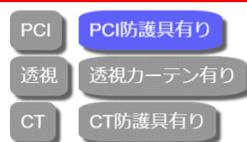
防護の最適化のステップ

放射線防護教材・関連資料

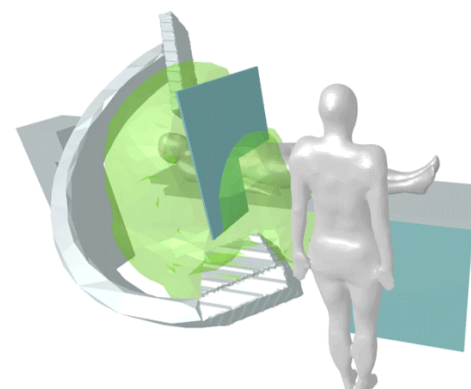
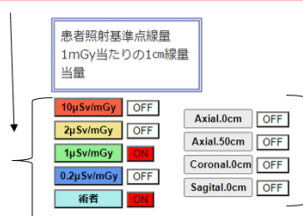
WebVR/AR散乱線可視化教材

- WebVR/ARとは・・・Webブラウザ上で動作可能なVR/ARコンテンツ。インターネット環境さえあれば専用ソフトをインストールすることなく、また様々なOS（Windows, Mac, Linux, iOS, Android）で動作させることが可能。

装置、防護具の有無を選択



3次元散乱線分布と術者の表示を切り替え



患者に対して横断、冠状断、矢状断の2次元線量分布の表示の切り替え

三次元空間は、マウスにより回転、拡大、縮小、平行移動できます。
webARもボタンのレイアウトは同じです。

・ [ポータブル撮影のWebVR散乱線可視化教材\(サイトへ移動\)](#)

・ [演習テキスト\(pdf\)](#)

臥位ポータブルX線撮影（病棟、手術室、救急等想定）時の患者周辺の散乱線の広がりをWebブラウザ上で可視化、学習できます。

・ [PCI、透視、CTのWebVR散乱線可視化教材](#)

PCI、透視、CT（防護具 有/無）での散乱線の広がりをWebブラウザ上で可視化、学習できます。
（テキスト例：[WebVR透視業務における外部放射線による放射線防護の演習.pdf](#)）

透視での操作画面

2021年改訂版 循環器診療
における放射線被ばく
に関するガイドライン

改正電離則への対応を支
援するコンテンツ

医療スタッフの放射線安
全に係るガイドライン

IVRにおける放射線防護教
材 (IAEA)

リンク集



関係機関

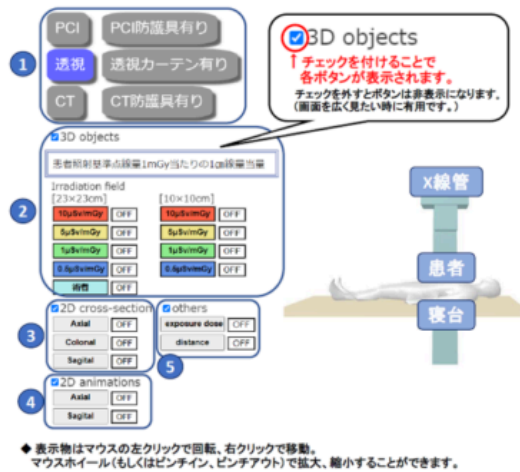
関係法令

関係学会等ガイドライン

日本工業規格

医療放射線防護に関する
サイト

表示物について



ボタンの機能について

(ON, OFFを押すことで切り替えられ

JA

- 1 モダリティ
変更ボタン モダリティを切り替えることができます。
この演習では“透視”と“透視カーテン
有り”のボタンを使用します。
- 2 3D線量
表示ボタン ボタンに表示されている線量の散乱線
が3D表示されます。
- 3 2D断面分布図
表示ボタン 各断面における散乱線分布図が表示
されます。
- 4 2D断面分布
アニメーション
表示ボタン 照射して散乱線が広がる二次元断面
の様子が動画表示されます。
- 5 exposure dose
表示ボタン 術者の被ばく線量が部位ごとに表示さ
れます。
- distance
表示ボタン 床から100cm、150cmの高さそれぞれ
における照射野中心から50cm、100cm、
150cmの点での線量が表示されます。

・PCI、透視、CTのWebAR散乱線可視化教材

スマートフォンやタブレットでQRコードからサイトにアクセスし、カメラ操作
の許可をした上で下記ARマーカを映すと、装置や散乱線が表示されます。

ARマーカードownload



＊散乱線の計算にはモンテカルロコード [PHITS](#) を使用。

＊＊血管造影室のファントム周囲の周辺線量当量について、測定値とシミュレーションとの差は平均20%
程度。

[Sato N. Consideration of the protection curtain's shielding ability after identifying the
source of scattered radiation in the angiography. Radiation Protection Dosimetry, 175\(2\),
238-245. 2017](#)

WebVR教材動画例

WebVR mobile radiography



WebAR Angiography

 JA



WebVR fluorography 1



WebVR fluorography3



実習の流れ

1. 導入（20分）

2. 実習（35分）
3. 確認テスト（10分）
4. 解説（10分）+ iPadでの体験（15分）計90分



どのようなスタッフが高い放射線量を被ばくする可能性があるか？

- 放射線治療やCT検査では、検査時の介助を除き、照射中に立ち入る機会はほとんどないことから被ばくは少ない。
- X線透視での診療は、従事者がX線源（X線管や散乱X線源となる患者）の近くでの手技が必要となる。
- 被ばくは、X線透視時間、使用する遮蔽器具、手技中の立ち位置、装置の照射条件に依存する。

表示物について

ボタンの機能について
(ON, OFFを押すことで切り替えられます。)

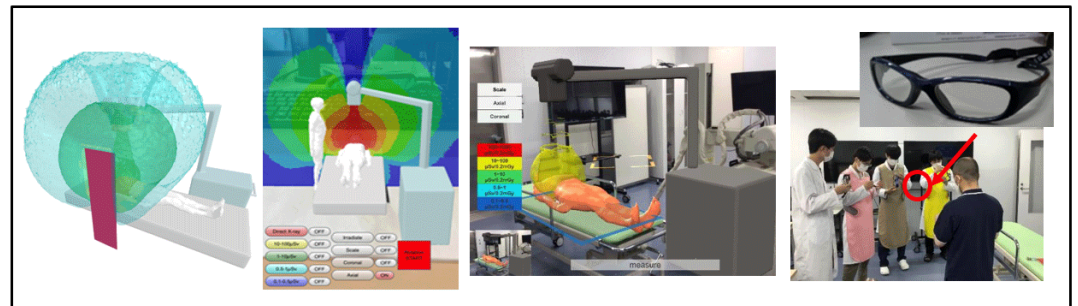
- 3D 線量表示ボタン: 記してある線量の散乱線が3D表示されます。(Direct X-rayは、X線からの直接線が主です。)
- Animation ボタン: 照射して散乱線が広がる二次元断面の様子が動画表示されます。
- Scale ボタン: 患者表面の高さで照射野中心からの距離と、A(50 cm)、B(100 cm)、C(150 cm)点における胸の高さの線量値が表示されます。
- Coronal Axial ボタン: 2D散乱線分布が表示されます。 ※演習1のみ介助者が表示されます。
- 演習演習 ボタン: 記載されている演習番号で用いるシステムに切り替わります。

◆ 表示物はマウスの左クリックで回転、右クリックで移動、拡大、縮小することができます。

※ボタンは連続で押すと反応が悪いので、2秒おいてボタンを押して下さい。

実習の目的の説明（20分）

操作方法の説明（5分）



実習項目

① 散乱線の3次元的な広がり

② 散乱線の水平面での広がり

③ 散乱線の垂直面の広がり

④ 照射野中心からの距離と線量の関係

⑤ 放射線防護具の効果

⑥ 胸部撮影と骨盤撮影の広がり

胸部撮影での線量分布

骨盤撮影での線量分布

教材を使用した感想と要望

- 自由に任意の位置から散乱線分布を確認でき**理解しやすい**
- 放射線の挙動が動画で示されることで発生源が**わかりやすい**
- 防護板の効果や危険な位置を認識できた

WebAR：デバイスを動かすだけで手軽に観察ができた

機種によっては動作が重い、ARマーカーの印刷が必要

WebVR：安定して動作する、マウス操作に慣れるのに少し時間がかかる

テキストと同時に見るのが難しい

iPadアプリ： 実物大で、危険な位置の距離感がつかみやすい

初学者に対して防護の原則を理解する上で有用

要望（今後の課題）

- 他のモダリティや患者体型の違いによる分布への影響、任意の位置の線量を知りたい
- 放射線検査室で装置を見学しながら **散乱線分布を確認** したい

ARX線室散乱線可視化アプリ X-SERVE

X線室散乱線可視化アプリ（X-ray examination ScatterEd Radiation VisualizE application）

モンテカルロ計算に基づいたポータブルX線撮影装置使用時の散乱線の挙動を拡張現実（AR）で可視化

[X-SERVE](#)

ポータブルX線撮影装置使用時（病棟撮影、手術室、救急検査室等）の散乱線の2次元、3次元分布をARで可視化

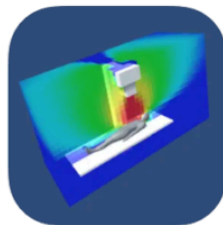
[X-SERVE IVR](#)

IVRでの散乱線をARにより可視化します。複数のCアーム角度、防護板の有無、オブジェクトの拡大縮小に対応。

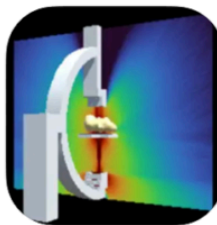
[X-SERVE VD](#)

X線撮影や透視等仰臥位での検査における散乱線分布のVolume Dataを使用し、X線診療室内の任意の散乱線分布の断面像を可視化。

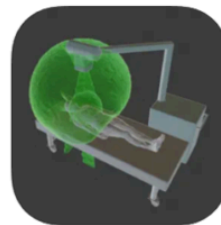
iPadおよびiPhone



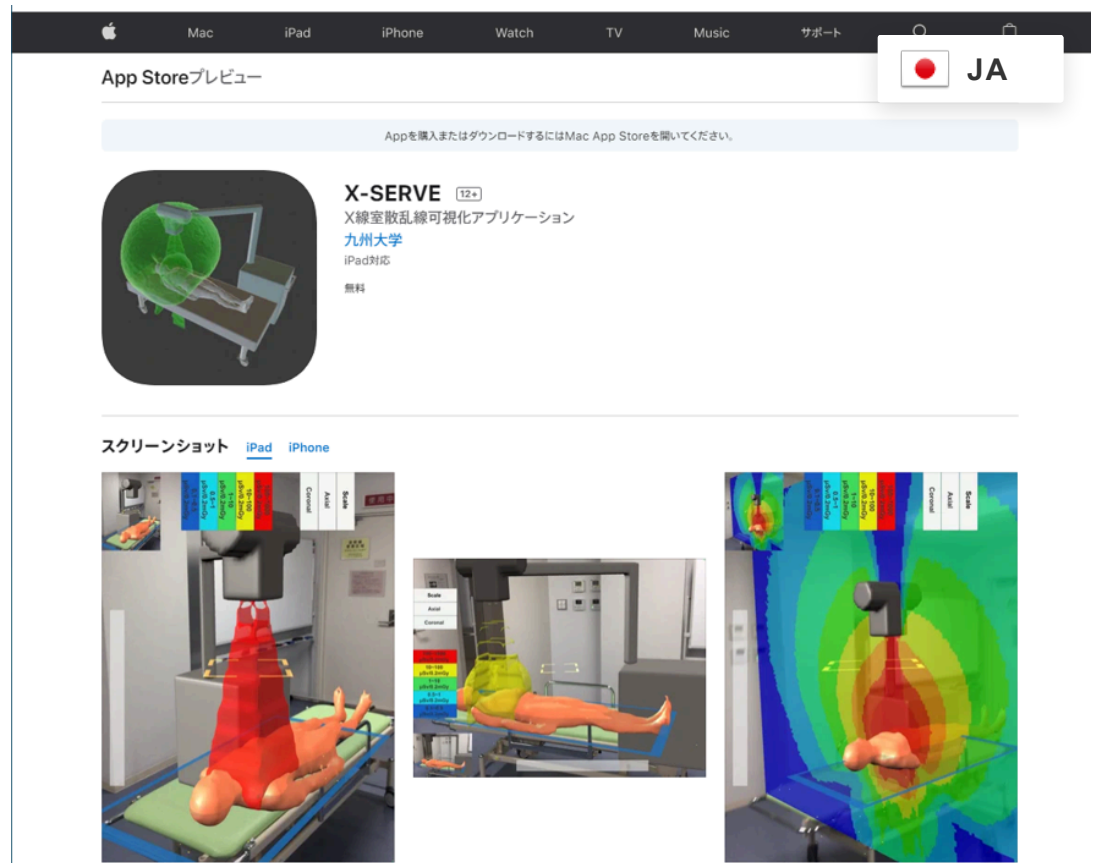
X-SERVE VD
教育



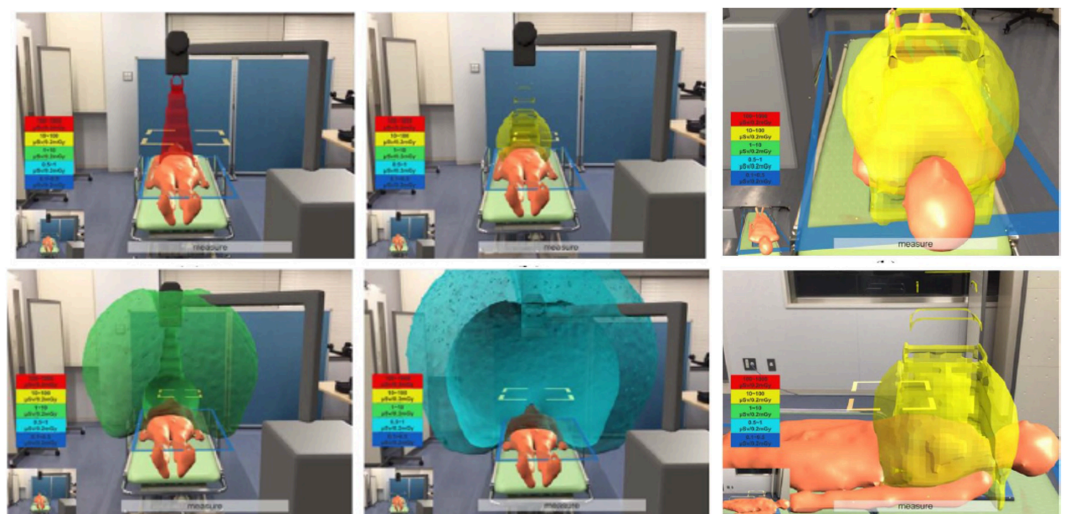
X-SERVE IVR
教育



X-SERVE
教育



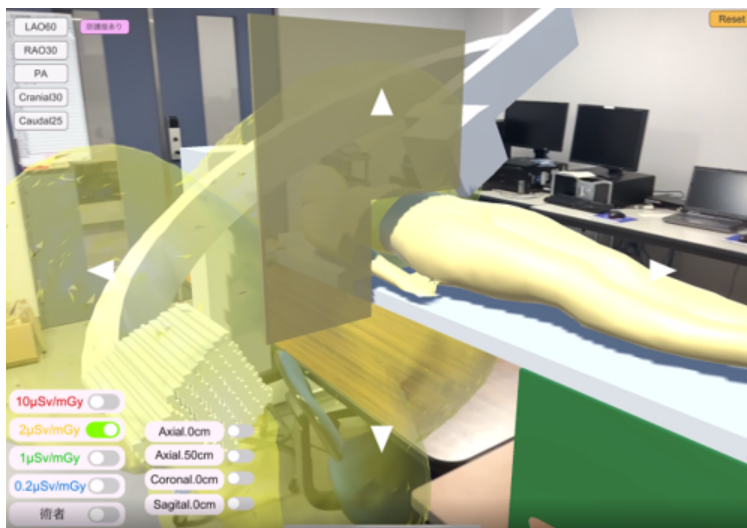
拡張現実を利用した散乱線分布の可視化



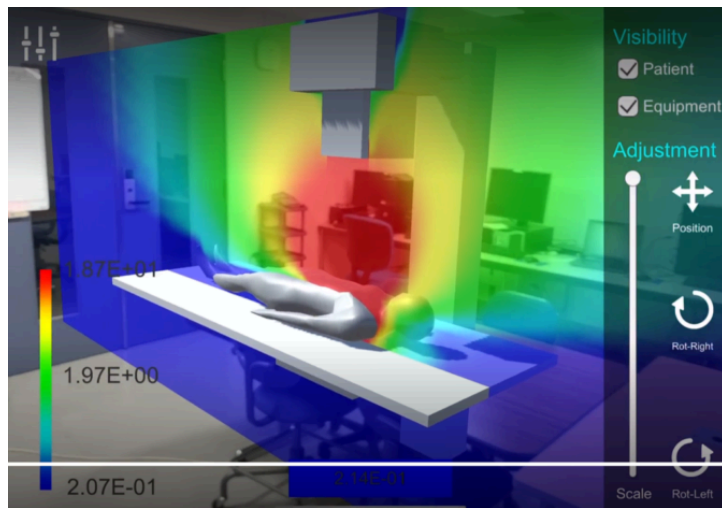
[Nishi, Development of an application to visualise the spread of scattered radiation in radiography using augmented reality, JRP, 2020](#)

X-SERVEの説明動画

X-SERVE IVRのデモ動画



X-SERVE VDのデモ動画



可視化ソフト ウェア ParaView

ParaViewはオープンソースのデータ可視化ソフトウェアで、インタラクティブに3次元のデータを表示、分析することが可能です。

<https://www.paraview.org/>

ParaView Glance

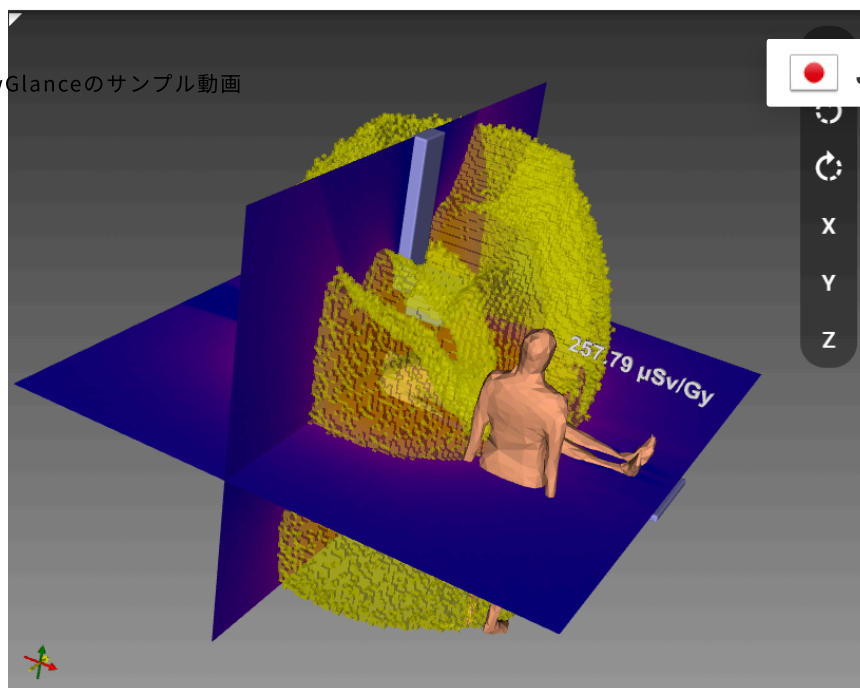
ParaViewの一部機能をブラウザ上で使用しデータを可視化できるWebアプリケーションです

[ParaViewGlance](#) webサイト

PCI散乱線分布の[サンプルファイル](#)

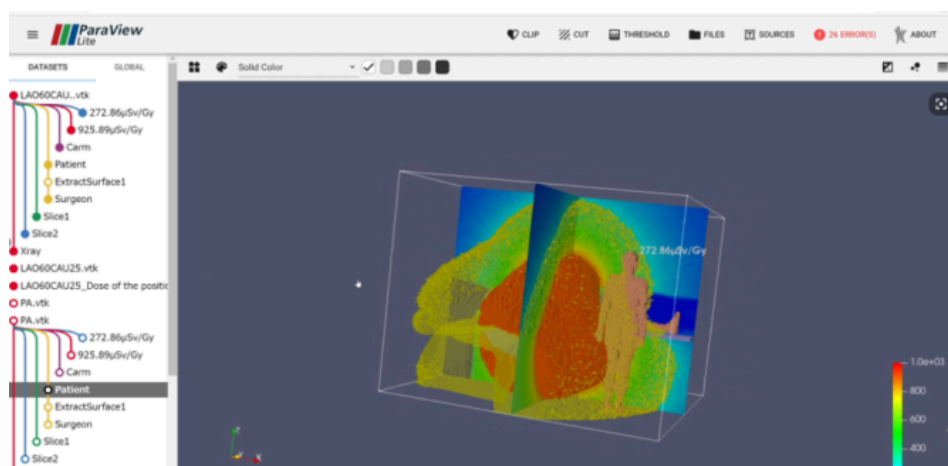
PaRaViewGlance サイト上部のOPEN A FILEにサンプルファイルをドラッグしLoadすると、添付のよう画面を表示できます。

ParaViewGlanceのサンプル動画



ParaView Lite

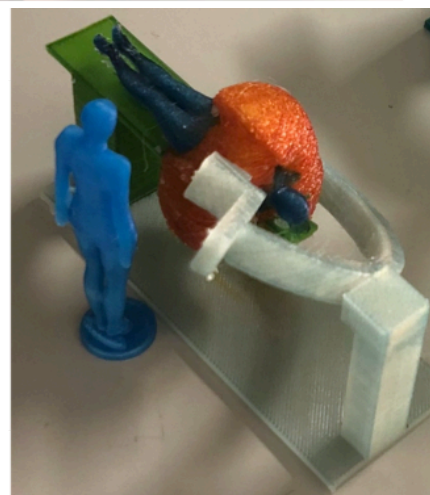
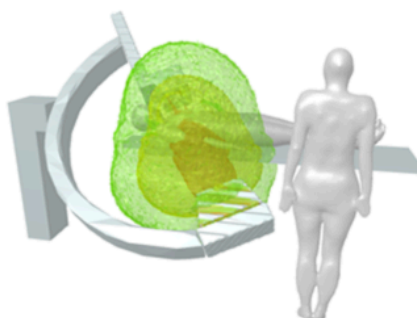
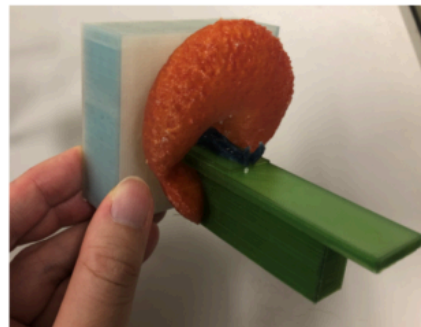
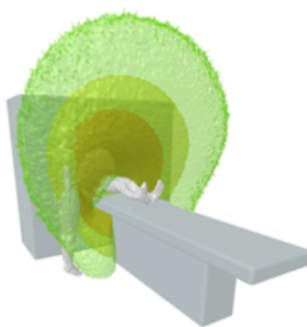
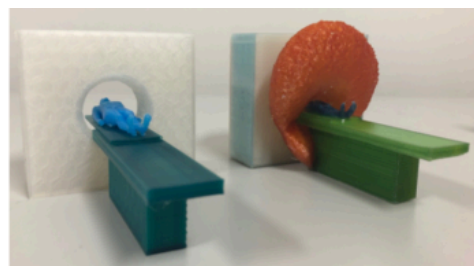
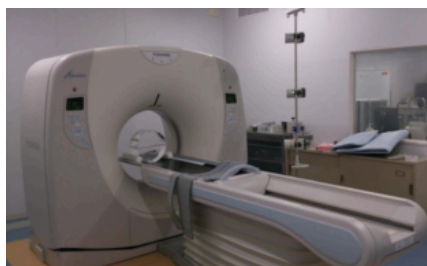
こちらもParaviewのWebアプリケーションで、散乱線断面のスクロールができます。



ParaViewLiteのサンプル動画

X線装置及び散乱線分布の3Dデータを基にした3Dプリンタ出力例

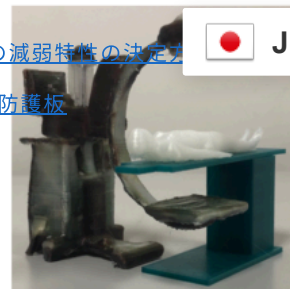
- 直接手で触り、好きな方向から容易に散乱線の広がりを確認することが出来る。



1

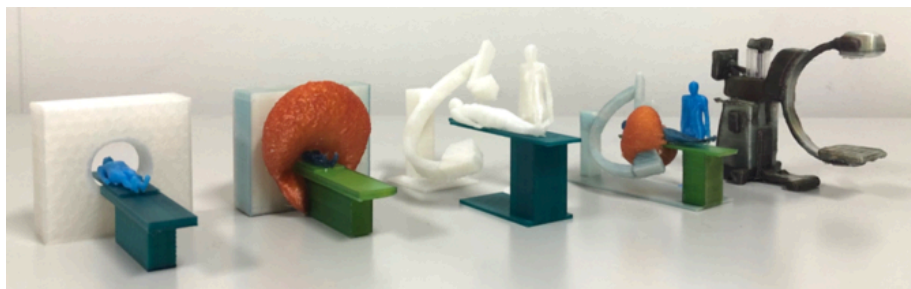
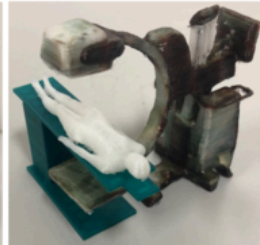
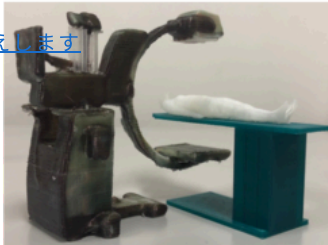
JIST 61331-1:2016

JIS T 61331-2:2010



1

病院における医療被ばくと職業被ばくの適正管理をサポートすることを目的に運営されています。

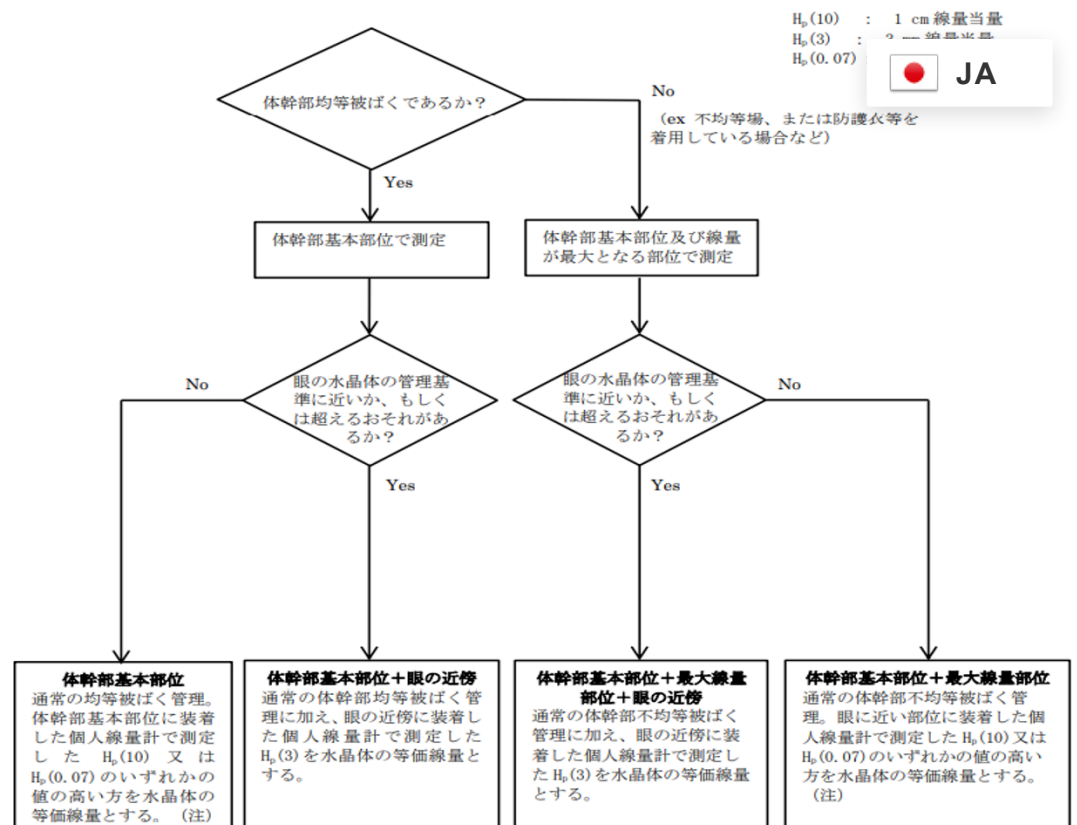


眼の水晶体の線量モニタリングのガイドライン

1

4

<http://www.jhps.or.jp/upimg/files/suishotai-guideline.pdf>



【例題 3】

眼の近傍で線量を測定することを開始すべきかを判断する線量レベル（**管理基準**）は、事業所の線量管理責任者が作業環境に応じて設定するとあるが、**どのような数値を採用**すれば良いか？

眼の近傍に個人線量計を装着することによる作業への負担および、放射線管理者の個人線量計管理の手間等を考慮の上、眼の近傍に個人線量計を装着するための通常の実施条件として、眼の水晶体の等価線量が**5年間の年平均の等価線量限度20 mSvを超える可能性がある場合**が考えられる。

例

- 個人線量計の不確かさ1.5を考慮し、年間 13 mSv(=20/1.5)を超える可能性がある場合
- 個人モニタリングの不確かさが 1.2 と評価できるような場合は、管理基準を年 17 mSv(≒20 mSv/1.2)
- 防護の最適化を図ってもやむを得ず年間 20 mSv を超える作業者がいる場合、その時点で、眼の水晶体の等価線量の5年間管理の対象者として、水晶体の専用の個人線量計を装着

【例題 5】

眼の水晶体被ばくに対する防護の最適化において、線量モニタリング結果はどのように使えばよいか？

しきい線量が0.5 Gyであることから、線量限度を遵守するだけでなく、**防護の最適化**を考慮する必要がある。

防護の最適化

- 防護手段に係る時間、金銭、諸機材等のコストを考慮しながら、防護手段により達成される被ばく低減対策を必要に応じ実施（ICRP Publ.75）
- モニタリング結果は、防護の最適化の施策の妥当性の確認に使用し、想定と異なった場合は原因を分析し、改善することが必要

防護の最適化のステップ

1. 工学的対策

- 作業から線源を物理的に隔離し、外部被ばくを低減する
- 線源と術者の適切位置関係や、防護板や防護眼鏡等の効果的活用

2. 管理的対策

- 環境測定やシミュレーション等により事前に被ばく量を把握し、作業手順、工学的管理である遮蔽の追加等により低減の可能性を検討
- 作業者は、自身の作業を適切に行うための知識と技術が必要
- そのために被ばく低減の啓発普及とともに模擬作業による手順の確認と課題検討が有効

眼の水晶体の線量モニタリングのガイドライン

2021年改訂版 循環器診療における放射線被ばくに関するガイドライン

日本循環器学会
日本インターベンショナルラジオロジー学会
日本医学放射線学会
日本核医学会
日本血管撮影・インターベンション専門診療放射線技師認定機構
日本不整脈心電学会
日本心血管インターベンション治療学会
日本放射線技術学会

放射線被ばくの現状と考え方
放射線安全管理の基礎知識
放射線被ばく管理の実際

2019-2020 年度活動

2021 年改訂版
循環器診療における放射線被ばくに関するガイドライン
JCS 2021 Guideline on Radiation Safety in Cardiology

2021 年 3 月 27 日発行

合同研究班参加学会

日本循環器学会 日本インターベンショナルラジオロジー学会 日本医学放射線学会
日本核医学会 日本血管撮影・インターベンション専門診療放射線技師認定機構
日本不整脈心電学会 日本心血管インターベンション治療学会 日本放射線技術学会

班長

上妻 謙
帝京大学医学部
循環器内科

班員

池田 隆徳 東京大学大学院医学研究科 循環器内科	石綿 清雄 日比谷若林クリニック 循環器内科	小嶋 光太郎 東京ベイ・浦安市川医療センター 循環器内科	加藤 守 秋田県立病院・新井野センター 放射線科診療部
近藤 浩史 帝京大学医学部 放射線科	坂本 肇 順天堂大学保健医療学部 診療放射線学科	鈴木 遼 東京女子医科大学東医療センター 放射線科	岡島 京子 杏林大学医学部付属病院 循環器内科
谷澤 貞子 慶応義塾大学 循環器内科	近藤 大志郎 東京医科大学 循環器内科	橋本 順 東京大学医学部 専門診療放射線科	本江 純子 聖名記念病院 循環器センター
松原 孝祐 金沢大学医学部保健研究センター 保健学系分子医療技術学	松本 一真 兵庫医科大学病院 放射線技術部	松本 直也 日本大学病院 循環器内科	

協力員

阿部 光一郎 東京医科大学 放射線科	天野 英夫 東京大学大学院医学研究科 循環器内科	飯森 隆志 千葉大学医学部附属病院 放射線科	上田 明子 杏林大学医学部 千葉医科大学 放射線科
河合 秀樹 慶応義塾大学 循環器内科	小宮 寿徳 東京医科大学 循環器内科	鈴木 康之 日本大学病院 循環器内科	武田 和也 順徳記念病院 放射線科
仲間 達也 東京ベイ・浦安市川医療センター 循環器内科	日置 結文 帝京大学医学部附属病院 循環器内科	山下 高史 東京大学医学部付属病院 放射線技術科	

1

https://www.j-circ.or.jp/cms/wp-content/uploads/2021/03/JCS2021_Kozuma.pdf

改正電離則への対応を支援するコンテンツ

- 事故事例から学ぶ放射線安全管理
- 個人の被ばく線量管理
- 医療分野における職業被ばくと放射線防護

ひと、くらし、みらいのために

 **厚生労働省**
Ministry of Health, Labour and Welfare

ホーム

▼ 本文へ ▶ お問い合わせ窓口 ▶ よくある御質問 ▶ サイトマップ ▶ 国民参加の場

Google カスタム検索

検索

テーマ別に探す | 報道・広報 | **政策について** | 厚生労働省について | 統計情報・白書 | 所管の法令等 | 申請・募集・情報公開

ホーム > 政策について > 分野別の政策一覧 > 雇用・労働 > 労働基準 > 安全・衛生 > 電離放射線障害防止に関する参考資料

電離放射線障害防止に関する参考資料

▼ [令和3年4月1日施行 改正電離則の解説動画（令和2年12月作成）](#)

▼ [医療機関における被ばく線量管理のヒント（動画）](#)

- 事故事例から学ぶ放射線安全管理（令和3年1月作成）
- 個人の被ばく線量管理（令和2年12月作成）
- 医療分野における職業被ばくと放射線防護（令和2年12月作成）

▼ [廃炉作業被ばく低減ウェブサイト（1 F E d u）](#)

令和3年4月1日施行 改正電離則の解説動画（令和2年12月作成）（約21分）

スライドのダウンロードは[こちら](#)から

▶ 政策について

▼ 分野別の政策一覧

▶ [健康・医療](#)

▶ [子ども・子育て](#)

▶ [福祉・介護](#)

▼ 雇用・労働

▶ [雇用](#)

▶ [人材開発](#)

▶ [労働基準](#)

▶ [雇用環境・均等](#)

https://www.mhlw.go.jp/stf/seisakunitsuite/bunya/koyou_roudou/roudoukijun/anzen/0000186714_00001.html

医療スタッフの放射線安全に係るガイドライン

101

医療スタッフの 放射線安全に係る ガイドライン

～水晶体の被ばく管理を中心に～



1. ガイドライン作成の背景と目的

2. 放射線の安全利用

2-1 放射線安全利用の基礎知識

1) 放射線領域で用いる単位、2) 医療放射線の安全衛生管理の原則、3) 被ばく管理の基本と法令

2-2 透視を用いた検査・治療

1) 防護衣の着用効果、2) 防護メガネの効果、3) 遮へい板の具体的利用方法、簡易な防護方法の紹介、4) 立ち位置への配慮、5) 手指の被ばくへの配慮、6) パルスレート、7) X線撮影、8) 絞りの活用、9) 拡大透視とデジタルズーム、10) 手技時の線量記録、11) 手技内容の共有、12) 患者線量低減と術者の線量低減の関係、13) 放射線診療時の検査室内の線量分布、14) 水晶体の線量が高くなる恐れがあるときの対応策

3. 歯科領域の放射線防護

4. 参考文献

IVRにおける放射線防護教材 (IAEA)

<https://www.iaea.org/resources/rpop/resources/training-material#14>

Radiation Protection in Interventional Procedures:
Practical Tutorials



1. Effect of fluoroscopic projection on staff radiation dose

2. Effect of collimation on staff radiation dose

3. Virtual collimation and its effect on staff radiation dose
4. Effect of patient size on staff radiation dose
5. Effect of ceiling suspended screens on staff radiation dose
6. Effect of lead aprons on staff radiation dose
7. Effect of fluoroscopy mode on patient and staff radiation dose
8. Effect of magnification on patient and staff radiation dose
9. Effect of patient-X ray tube distance on patient radiation dose
10. Effect of patient-image receptor distance on staff radiation dose
11. Effect of radiation protection gloves on patient and staff radiation dose
12. Real time dose monitoring systems
13. Radiation and cataract

リンク集

関係機関

(国内機関・団体)

放射線審議会

■眼の水晶体の放射線防護検討部会 (2017-2018)

- [検討会議事録\(第1-7回\)](#)
- [眼の水晶体に係る放射線防護の在り方について \(2018\)](#)

厚生労働省

■眼の水晶体の被ばく限度の見直し等に関する検討会

- [検討会 議事録、資料等](#)
- [眼の水晶体の被ばく限度の見直し等に関する検討会 報告書 \(2018\)](#)

■電離放射線障害防止対策について

■電離放射線障害防止に関する参考資料

■労災疾病臨床研究事業費補助金研究報告書

- 平成27－28年度研究課題 7．放射線業務従事者の被ばく線量の測定及び評価に関する研究

[放射線業務従事者の眼の水晶体等末端部等価線量の適切な評価及び被ばく線量の低減に関する研究 \(研究代表者：古渡 意彦\)](#)

- 平成30年度－令和2年度研究課題 7－1．放射線業務における被ばくの実態と被ばく低減対策に関する調査研究

[不均等被ばくを伴う放射線業務における被ばく線量の実態調査と線量低減に向けた課題評価に関する研究 \(研究代表者：樺田 尚樹\)](#)

- 令和元年度－令和3年度研究課題 7－1．放射線業務における被ばくの実態と被ばく低減対策に関する調査研究

[放射線業務における被ばくの実態と被ばく低減対策に関する調査研究 \(研究代表者：工藤 崇\)](#)

[医療分野の放射線業務における被ばくの実態と被ばく低減に関する調査研究 \(研究代表者：細野 真\)](#)

- 令和2年度－令和4年度研究課題 7．眼の水晶体の放射線防護に資する機材開発推進および被ばく低減のための多角的研究

[眼の水晶体の放射線防護に資する機材開発推進および被ばく低減のための多角的研究 \(研究代表者：千田 浩一\)](#)

- 令和3年度－令和5年度研究課題 6.放射線防護マネジメントシステムの適用と課題解決に関する研究



[原子力規制庁](#)

■ [国際基準等の出版物の翻訳](#)

[個人線量測定機関協議会](#)

■ [実効線量の分布表](#)

労災疾病臨床研究事業費補助金
総合（令和4年度～令和6年度）分担研究報告書
デジタルトランスフォーメーションを活用した医療従事者の被ばく低減プログラム
の開発と有効性の検証（220201）

血管造影における3次元散乱線分布の可視化と表示ツールによる比較

研究代表者 藤淵 俊王 九州大学大学院医学研究院保健学部門医用量子線科学分野 教授
研究協力者 中島 美沙希 九州大学大学院医学系学府保健学専攻医用量子線科学分野

研究要旨

心臓カテーテル検査室内の散乱線分布を把握することは放射線防護対策のために重要である。そこで本研究では、モンテカルロシミュレーションにより計算した様々な条件における検査室内の散乱線ボリュームデータをもとに適切な可視化表現手法について検討した。表現法として、線量プロファイル、2次元断面、3次元散乱線分布、4次元散乱線分布を行った。また、表示ツールはParaView、ParaViewGlanceやParaViewLiteの3つを比較した。モンテカルロシミュレーションコードPHITSを用いて、心臓カテーテル検査室内の散乱線分布を計算し、.VTK ファイルを出力した。それをそれぞれの表示ツールを使って分布を見て、比較した。角度や防護の有無による散乱線分布の違いが確認できた。散乱線分布の可視化により、危険な位置や放射線防護具の適切な配置位置を容易に把握することができた。表示ツールについても特徴を理解し、それぞれの環境に合ったものを使用すべきである。

A. 研究目的

A.1 背景

2011年4月にInternational Commission on Radiological Protection (ICRP)より、組織反応に関する声明118[1]が出された。ICRP118の声明前後による計画被ばく状況での職業被ばくの線量限度を表1に示した[1,2]。声明では、計画被ばく状況での職業被ばくについて、眼の水晶体等価線量限度を年間150 mSvを超えないから定められた5年間の平均で20 mSv/年かついずれの1年においても50 mSvを超えないに変更された。このため、水晶体の白内障や発がんのリスクを下げるためにも適切な放射線防護対策が求められている。放射線診療の中でも、血管造影検査や血管内治療は近年、実施数が増加しており、検査を実施する医療従事者の放射線防護が重要となって

いる[3]。特に、心臓カテーテル検査の循環器内科の医師は他の医療従事者に比べて、被ばくが多いことが知られている[4]。

X線透視装置の利用で放射線診療従事者の被ばくに寄与するのは、主に患者からの散乱線である[5]。放射線診療従事者の被ばくを減らす方法として、被ばく時間の制限や遮蔽の使用、距離を置くことがある[6]。これは防護の三原則の時間、距離、遮蔽につながる。中でも、天吊り防護板や防護カーテンのような放射線防護具の有効性が示されている[7,8]。一方で、患者からの散乱線による被ばくは、撮影条件や防護具の条件で大きく変化する。診療室内の散乱線分布を把握することは適切な放射線防護具の配置や危険な位置からの退避といった放射線防護対策に役立つ。

Table.1 ICRP118の声明前後による計画被ばく状況での職業被ばくの線量限度

	2007年勧告	ICRP118 声明発表後
実効線量	定められた5年間の平均で20 mSv/年、 かついずれの1年においても50 mSvを超えない ^{a)}	
眼の水晶体	150 mSv/年	定められた5年間の平均で20 mSv/年、 かついずれの1年においても50 mSvを超えない
皮膚 ^{b,c)}	500 mSv/年	

- a) 妊娠女性の職業被ばくには追加の制限が適応される。
- b) 実効線量のこの制限は、皮膚の確率的影響に対して十分な防護を与える。
- c) 被ばく面積に関係なく、皮膚面積 1 cm² 当たりの平均である。

A.2 放射線防護における可視化研究

放射線防護対策資料として、近年、X線撮影装置による散乱線分布の可視化に関する研究が盛んに行われている[9-11]。散乱線分布を評価する方法として、放射線検出器で複数の点を測定する方法とモンテカルロシミュレーションによって評価する方法がある。散乱線分布を表示する場合、実測では1点だけでなく、複数の位置での測定が必要であり、サーバイメータなどで測定するのは時間がかかり、空間分解能が悪くなる。しかし、モンテカルロシミュレーションでは三次元の線量分布を高い空間分解能で評価することが可能である。そのため、線量評価ツールや散乱線分布表示として多くで用いられている[12-16]。線量分布については、心臓カテーテル検査室内についても活発に研究されている。しかし、実測の場合、分布が論文により異なる[17,18]。また、心臓カテーテル検査は他の検査と異なり、様々なCアーム角度による検査を行っている。しかし、シミュレーション研究でもある特定の角度における断面や散乱線分布のみ得られている[16]。そして、術者への線量はCアームの角度によって変化する[19]。そのため、放射線防護対策として多くのCアーム角度における散乱線分布も必要である。加えて、放射線防護教育を目的とした、散乱線の時間変化を示す4次元分布[20]や放射線防護板の位置による術者の低減効果への影響について研究はあまりされていない。

A.3 表示ツールの説明

1.1 や 1.2 ではオープンソースのマルチプラットフォーム化学分析および可視化ツールのParaView[21]を用いて、様々な条件における散乱線分布を表示した。様々な操作ができるという利点はあるが、アプリケーションであるため、インストールを行わなければならないという欠点がある。多くの人に簡単に散乱線分布を表示してもらい、放射線防護について学んでもらいたい。そこで、アプリケーションではなく、Webブラウザ上で操作できる表示ツールを使用した。今回はParaViewGlanceとParaviewLiteの2点である。この3つの表示ツールによる比較はされていない。

A.4 目的

本研究の目的は、モンテカルロシミュレーションコード PHITS を用いて、心臓カテーテル検査室内における散乱線分布を様々な照射角度、防護の有無による条件で表示し、それに対しての適切な放射線防護方法の検討することである。そして、ParaView、ParaViewGlance、ParaViewLite の3つの可視化の表示ツールに対する特徴を提示した。

B. 研究方法

B.1 散乱線分布のシミュレーション

本研究ではモンテカルロシミュレーションコード Particle and Heavy Ion Transport code System(PHITS)[ver.3.24][22]を使用した。血管造影検査室は、Sato らが作成したモデル[23]を利用した。血管造影検査室の空間は床が 300×300 cm² であり、床から天井の高さは 230 cm であった。この空間にはX線管、X線源、画像検出器、Cアーム、患者、術者を設置した。Source Image receptor Distance(SID)は 105 cm、線源アイソセンタ間距離は 70 cm、床から寝台までの距離は 83 cm、照射野は 15×15 cm² に設定した。患者については、ICRP110 の男性のボクセルファントム[24]を使用した。照射するX線光子数は 1×10¹⁰ とし、室内全体の光子フルエンスを 1 辺 2 cm の 3次元分布として出力した。フルエンスから患者照射基準点を基準とした際の周辺線量当量 b [μSv/Gy]への変換式は下記の式1に示した。

$$b = \frac{a \times t}{x} \quad \dots \text{式 1}$$

a は1線源あたりのフルエンス[1/cm²/source]、t は ICRP74 の「光子フルエンスから周辺線量当量 H*(10)への換算係数」[25]、xは患者照射基準点での空気カーマ[mGy]を示した。分子の a × t は 1 線源あたりの周辺線量当量[pSv/source]を示している。

この条件で PHITS により、Visualization Toolkit(.VTK)のフォーマットのファイルを出力させた。

臨床現場では、様々なCアーム角度や放射線防護具を使用して、作業を行う。そのため、ここでは、以下の 2.1.1、2.1.2 の条件において計算を行った。

B.1.1 様々な C アーム角度の透視条件

照射条件としては臨床で用いる角度を想定し、表 2 に 10 種類の角度条件を示した。C アーム角度の LAO 60,RAO 30,CAU 30,CRA 30,PA 条件での傾いている様子を図 1 の a-e に示した。線源は、診断 X 線スペクトル計算ソフトウェアである X-spectrum (2023 年 1 月 13 日時点では X-ray-

Spectrum に変更されている) [26]を用い、管電圧 73 – 85 kV、ターゲット角度 12 度、総濾過 3.4 mmAl + 0.9 mmCu での光子の連続エネルギースペクトルとした。また、C アーム角度によって体厚が変わる。そのため、C アーム角度によって使用した管電圧を表 2 に示す。この管電圧は九州大学病院で使用されている透視条件より引用した。

Table.2 管電圧と C アーム角度

管電圧	C アーム角度
73 kV	Posterior-Anterior view(PA)
77 kV	Right Anterior Oblique position 30(RAO 30)
78 kV	Cranial 30(CRA 30)
81 kV	Left Anterior Oblique position 60(LAO 60)、 Left Anterior Oblique position 60 Caudal 25(LAO 60 CAU 25)
82 kV	Caudal 30(CAU 30)
84 kV	Right Anterior Oblique position 15 Cranial 30(RAO 15 CRA 30)、Right Anterior Oblique position 30 Caudal 30(RAO 30 CAU 30)、Right Anterior Oblique position 30 Cranial 30(RAO 30 CRA 30)
85 kV	Left Anterior Oblique position 45 Cranial 25(LAO 45 CRA 25)

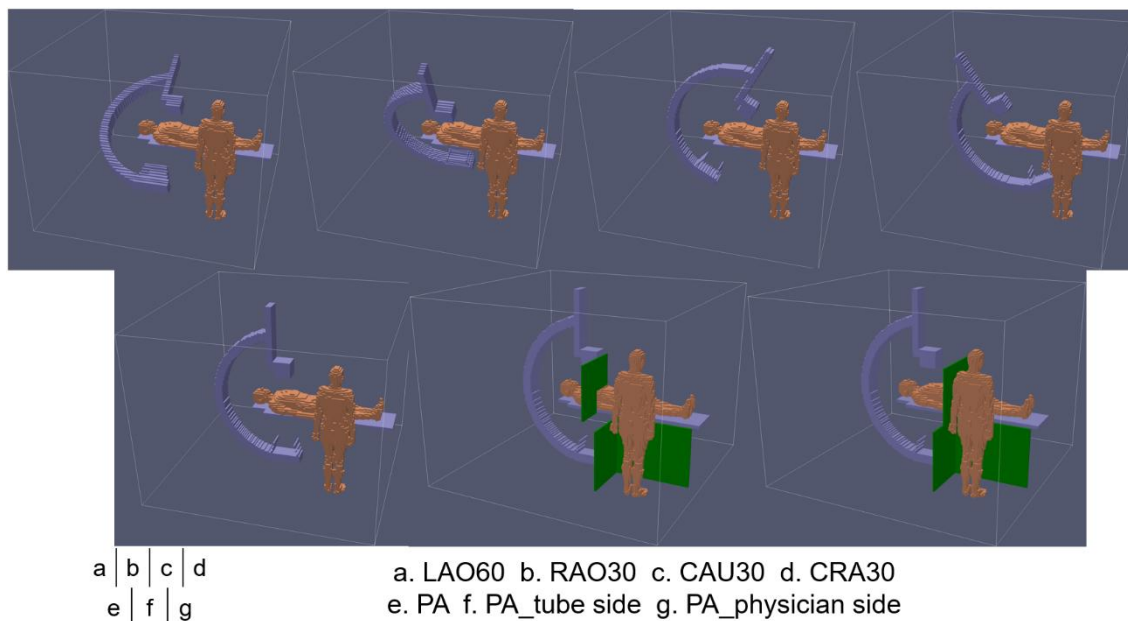


Figure.1 C アーム角度、放射線防護具による位置関係

a から順に Left Anterior Oblique position 60(LAO60)、Right Anterior Oblique position 30(RAO30)、Caudal 30(CAU 30)、Cranial 30(CRA 30)、Posterior-Anterior view(PA)の 5 つの条件の C アーム角度の位置関係を示している。ここでは、X 線管、検出器、寝台、C アーム、患者、術者を表示している。

下段には防護具なしの PA、天吊り防護板をアイソセンタ側に近づけ、防護カーテンを置いた時の PA_tube side 条件、先ほどの天吊り防護板の位置から術者側に 30 cm 移動してかつ、防護カーテンを置いた時の PA_physician side 条件の 3 種類を示した。

B.1.2 術者の位置での放射線防護具の遮蔽効果 の検証

放射線防護板の術者への遮蔽効果を検証する上で2通りの角度条件で検証した。ひとつは基準となるPA方向の照射角度で、もう一つは全ての角度の術者の水晶体の位置での線量が高かったLAO 60からの照射角度である。それぞれ、L字型の直角の防護カーテンと天吊り防護板をつけて、散乱線分布を表示した。防護具の位置関係については図1のe-gに示した。これより、防護具なしの時のPA条件、天吊り防護板をアイソセンタ側に近づけ、防護カーテンを置いた時のPA_tube side条件、先ほどの天吊り防護板の位置から術者側に30 cm移動してかつ、防護カーテンを置いた時のPA_physician side条件の3種類の位置を示した。天吊り防護板はL型で縦は70 cm、横は65 cmの大きさであり、防護カーテンも同様にL型で寝台に垂直に35 cm、寝台に平行に60 cm、高さは75 cmの大きさである。どちらの防護具も厚さは0.5 mmであり、0.5mm鉛当量である。

B.2 散乱線分布の表示、評価方法

PHITSでそれぞれ出力した.VTKファイルを可視化のためのアプリケーション ParaView [ver.5.10.0][27]を用いて、仮想空間画面上にX線管、X線源、画像検出器、Cアーム、患者、術者を表示した。ParaViewとはオープンソースのマルチプラットフォーム化学分析および可視化ツールである。術者は患者の鼠径部あたりで手技を行う術者を想定した位置であり、アイソセンタから75 cm足側の位置とした。評価方法として、それぞれの条件に対し、術者の位置での線量プロファイル、2次元断面、3次元散乱線分布、4次元散乱線分布がある。

線量プロファイルについて、術者の位置で床から高さ200 cmまでの線量をそれぞれの条件で取得し、比較した。

次に2次元断面では以下の3つの断面を表示した。XY断面として、床から95 cmのアイソセンタの位置での断面、床から160 cmの術者の水晶体の位置での断面を示した。また、YZ断面として、アイソセンタから患者の足側に75 cmの位置での断面を示した。これは術者の位置での断面である。2次元断面のカラースケールは全て最小値5、最大値500 [$\mu\text{Sv/Gy}$]とした。

続いて、3次元散乱線分布では患者照射基準点Gyを基準とした際の周辺線量当量 μSv を出力した。1000 [$\mu\text{Sv/Gy}$]以上を赤色、1000 [$\mu\text{Sv/Gy}$]未満で300 [$\mu\text{Sv/Gy}$]以上を黄色で示した。1000 [$\mu\text{Sv/Gy}$]は術者の位置において、全ての角度で一

番線量が高いところ、300 [$\mu\text{Sv/Gy}$]は術者の水晶体の位置で一番高い線量を示している。

最後に4次元散乱線分布について、防護具なしのPAにおける放射線がX線管から放出されてから、8 nsまでの変化を1 nsごとに追った挙動を示した。

同様にして、角度別の線量プロファイル、160 cmの位置での2次元断面、95 cmの位置での2次元断面、YZ断面の2次元断面、3次元散乱線分布を示した。そして、防護具有の線量プロファイル、160 cmの位置での2次元断面、95 cmの位置での2次元断面、YZ断面の位置での2次元断面、3次元散乱線分布を示した。そして、最後に防護なしのPA条件における4次元散乱線分布を示した。

B.3 他の可視化の表示ツール

2.2の様々な条件における散乱線分布の表示は全てParaViewで行ったが、アプリケーションであるため、インストールしなければならないという欠点がある。その欠点を改善するためにブラウザ上で操作できるParaView GlanceやParaView Liteを使用した。それぞれこの2つの使い方を下記に説明した。

B.3.1 ParaView Glance

ParaView Glance[ver.4.20.0][28]はKitwareで開発された軽量のオープンソース Web アプリケーションである。ここでは、ParaViewと異なり、.VTKファイルが対応されていないため、Visualization Toolkit for Javascript(VTK.JS)ファイルに変更する必要がある。作成方法として、上記と同様にPHITSで散乱線分布を計算し、.VTKファイルを出力した。次にその.VTKファイルをParaViewに入れ、患者、術者、装置、2次元断面、3次元散乱線分布、患者照射基準点Gyを基準とした際の術者の水晶体の位置での周辺線量当量を表示した。その際にデータ容量を減らすために3DモデリングソフトウェアのMetasequoia[ver.4.8.2][29]で平滑化処理を行った。ファイル容量の比較を表3に示した。表3には2種類の分解能によるPHITSで出力した.VTKファイル、加工無しのVTK.JSファイル、加工有のVTK.JSファイルのデータ容量を示した。また、図2に分解能による見た目の違いを示した。図2はParaViewで分解能が異なる.VTKファイルを表示しているものであり、ファイルサイズは大きく変わるが、見た目はあまり変わらないことが分かる。また、ファイルサイズについては重いほど、

動きにくくなる。そのため、本研究では表の中で一番小さい 3,690 KB の間隔が 2 cm の加工を行った VTK.JS ファイルを使用した。最後に、再度、ParaView に入れ、全てを一つの VTK.JS ファイ

ルとして出力した。その VTK.JS ファイルを ParaViewGlance に入れ、検討した。使用方法としては ParaViewGlance にアクセスし、作成した VTK.JS ファイルをインプットして表示した。

Table.3 ファイル容量の比較

	PHITS の出力における散乱線分布の分解能	
	1 cm 間隔	2 cm 間隔
.VTK file	431,927 KB	53,999 KB
VTK.JS (加工無し)	35,000 KB	3,904 KB
VTK.JS (加工有)	-	3,690 KB

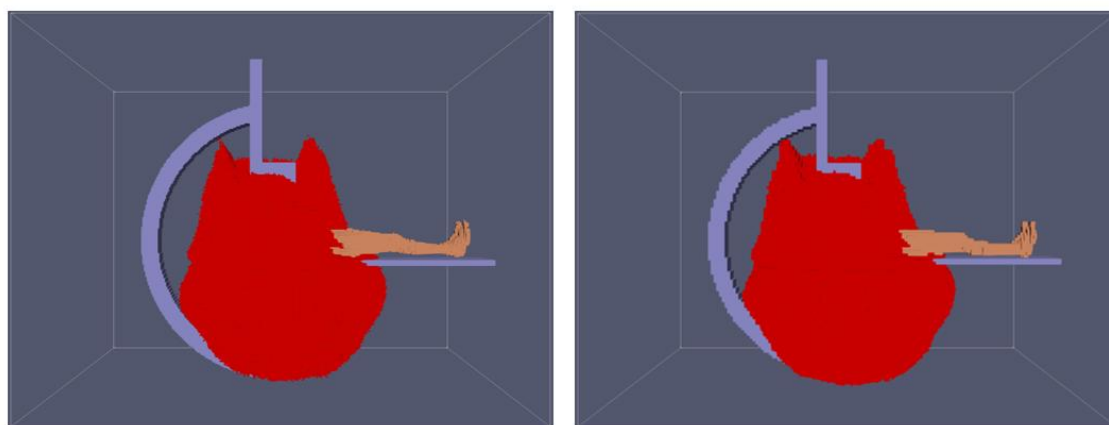


Figure.2 分解能による見た目の違い
(左：間隔が 1 cm 、右：間隔が 2 cm)

B.3.2 ParaView Lite

ParaView Lite[30][31]とは、ParaView サーバーに接続して、データ処理と可視化を実行するクライアントアプリケーションである。図 3 にはこの仕組みを示した。ここでのサーバーはデータや情報などのコンテンツを提供するコンピュータであり、ここでのクライアントはそのコンテンツを受け取る側である。そのため、クライアント、利用者が ParaView サーバーにアクセスすることで Web ブラウザ上において ParaView と同等の操作ができる。この ParaView Lite では 2 種類のファイルを使用した。一つは ParaView と同様に 3 次元空間の情報を持っている VTK ファイルであり、もう一つは ParaView state file(PVSM)ファイルである。これは ParaView 内で設定した条件を ParaView Lite で表示できるように保存した。そのため、これらのファイルで表示するためには事前に ParaView を用いて、作成しなければいけ

ない。まず、VTK ファイルを ParaView に入れ、そこから患者や散乱線分布等の表示したいものを作成し、選択した。この VTK ファイルから上記のような条件で表示するという設定を保存するのが PVSM ファイルである。そのため、ParaView Lite で表示するためには PVSM ファイルが持っている条件を VTK ファイルから持ってきて表示するという仕組みである。ParaView Lite で操作するためには Paraview Lite が搭載された PC で規定されている IP アドレスを自分自身が使用したい PC に入力することで繋がり、使用することが可能である。

(倫理面への配慮)

本研究では、ヒトに関するデータを使用することではなく、倫理面への配慮に関する項目はない。

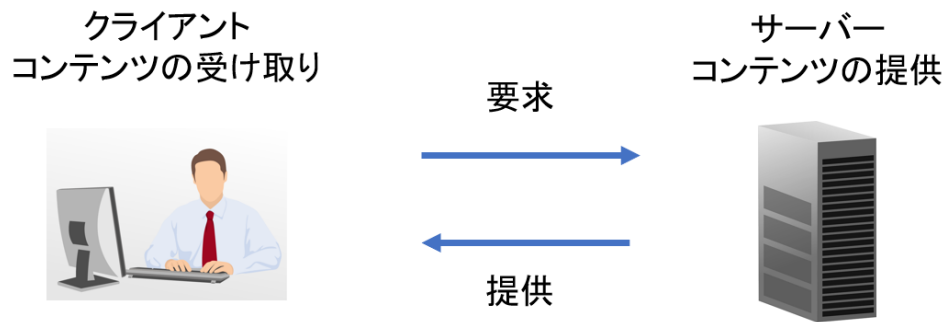


Figure.3 クライアントアプリケーションシステム

C. 結果

C.1 様々な C アーム角度の透視条件

図 4 に角度別の術者の位置での線量プロファイルを示した。縦軸は患者照射基準点を基準とした際の術者の位置での周辺線量当量を示し、横軸は術者の位置での床からの高さを示した。これより、測定では難しい複数の高さでの線量、様々な条件との比較を見ることができた。また、術者の足側では LAO 45CRA 25 条件での線量が高かった。70 cm には放射線感受性が高い生殖腺がある高さとなり、その高さでは LAO 45CRA 25 条件と LAO 60 条件の角度が高かった。反対に水晶体の位置、160 cm の位置では LAO 60CAU 25 条件、LAO 60 条件、PA 条件の方向で高くなっていた。術者の位置での床から 120 cm 以降の LAO 60CAU 25 条件や LAO 60 条件では、線量が減っているのが分かった。しかし、同じく術者の位置での床から 120 cm 以降の PA 条件や CAU 30 条件ではある位置で急激に線量が高くなっていた。

図 5 に XY 断面の床から 160 cm の水晶体の位置での断面、図 6 に XY 断面の床から 95 cm のア

イソセンタの位置での断面、そして、図 7 に YZ 断面のアイソセンタから患者の足側に 75 cm の位置での断面を示した。図より、術者と装置の位置関係とともに角度による散乱線分布の広がりを確認することができた。2 次元断面から、C アーム角度により、X 線の進行方向上の位置に患者による減弱が影のように現れた。LAO 方向と RAO 方向を比べると、術者の位置では、LAO 方向の方が高線量となり、それは患者の減弱がないことによる。また、それぞれの C アーム角度において、X 線管近傍では線量が高くなる傾向がみられた。

図 8 に 3 次元散乱線分布を示した。3 次元散乱線分布より、LAO 60 条件では術者の位置の頭頸部の辺りまで、300[μ Sv/Gy]の散乱線分布が広がっている。また、3 次元散乱線分布より、CRA 30 条件の時、PA 条件や CAU 30 条件の時と比べて、散乱線分布が術者にあまりかかっていない。しかし、2 次元断面をみると、CAU 30 条件は患者として使った人体ファントムの腹部と腕の隙間によって患者の減弱を受けなかった。

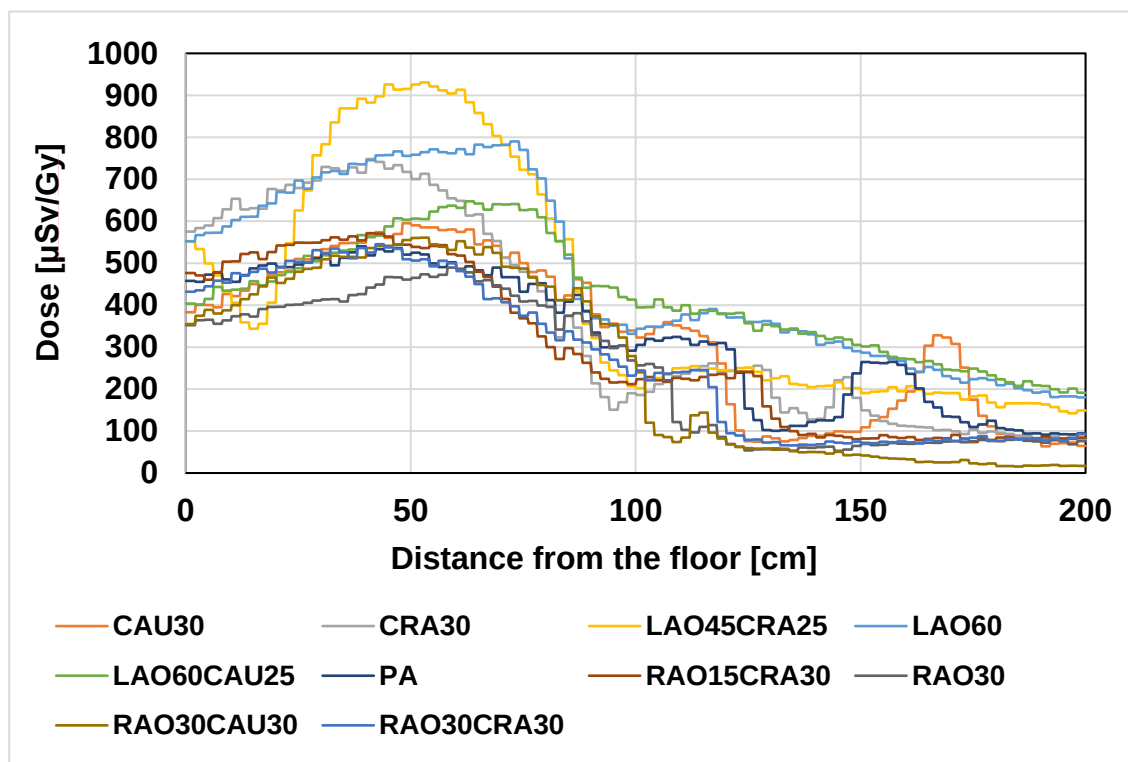


Figure.4 角度別の術者の位置での線量プロファイル
縦軸は患者照射基準点を基準とした際の術者の位置での周辺線量当量を示し、横軸は術者の位置での床から 200 cm までの高さを示した。角度は 10 種類の角度で比較を行った。

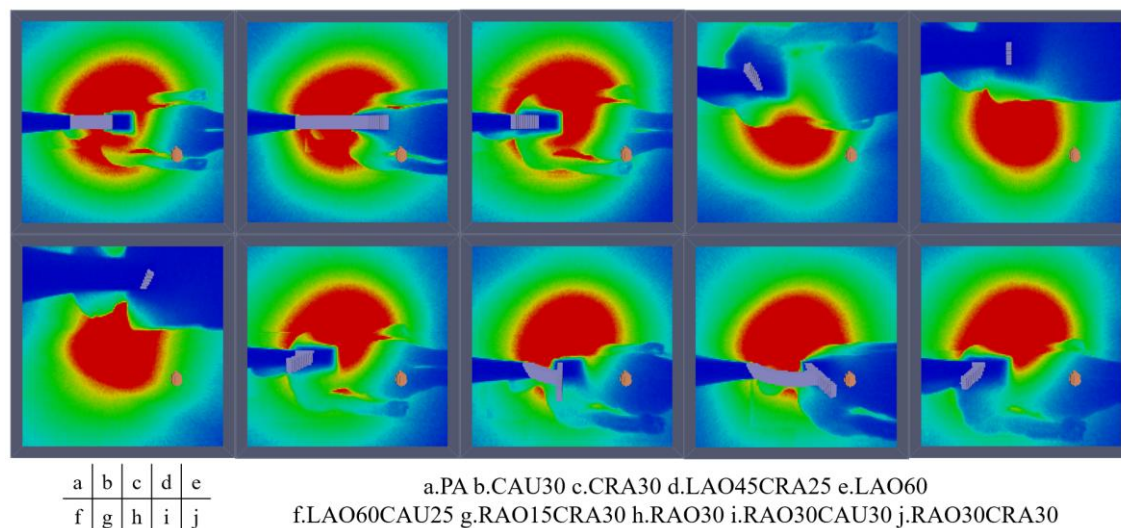
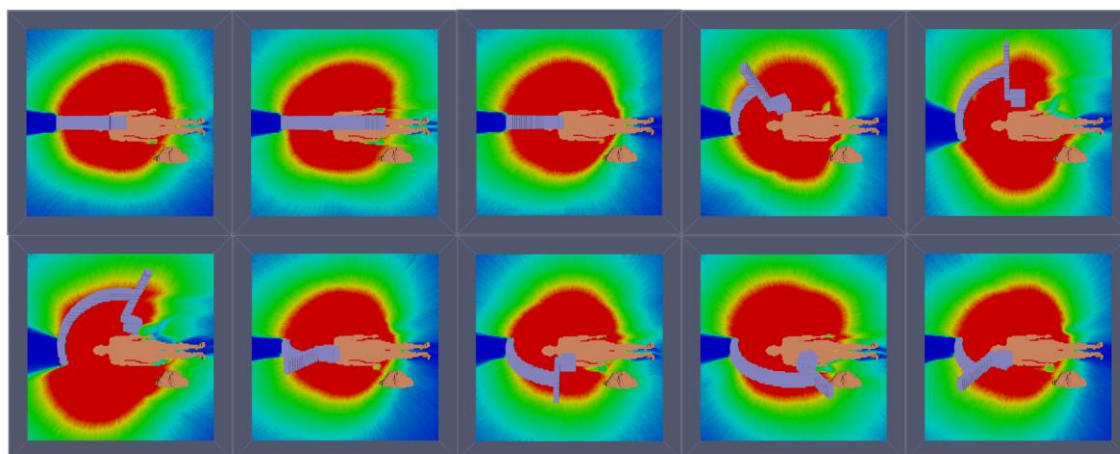


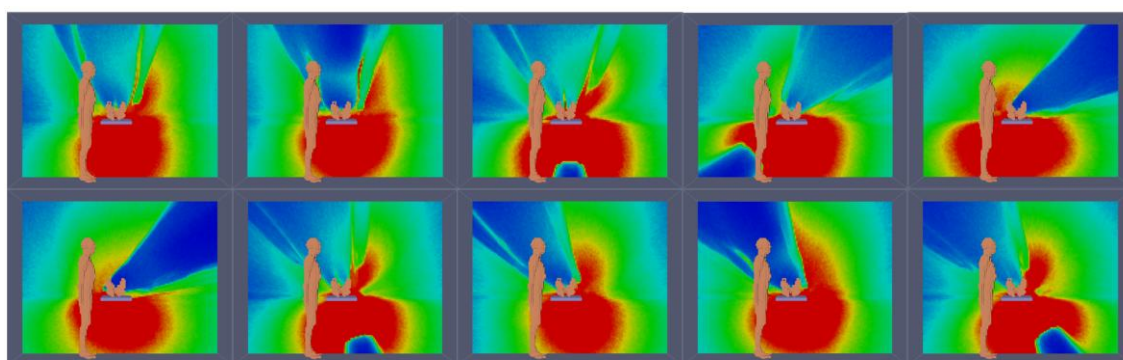
Figure.5 XY 断面の床から 160 cm の水晶体の位置での断面



a	b	c	d	e
f	g	h	i	j

a.PA b.CAU30 c.CRA30 d.LAO45CRA25 e.LAO60
f.LAO60CAU25 g.RAO15CRA30 h.RAO30 i.RAO30CAU30 j.RAO30CRA30

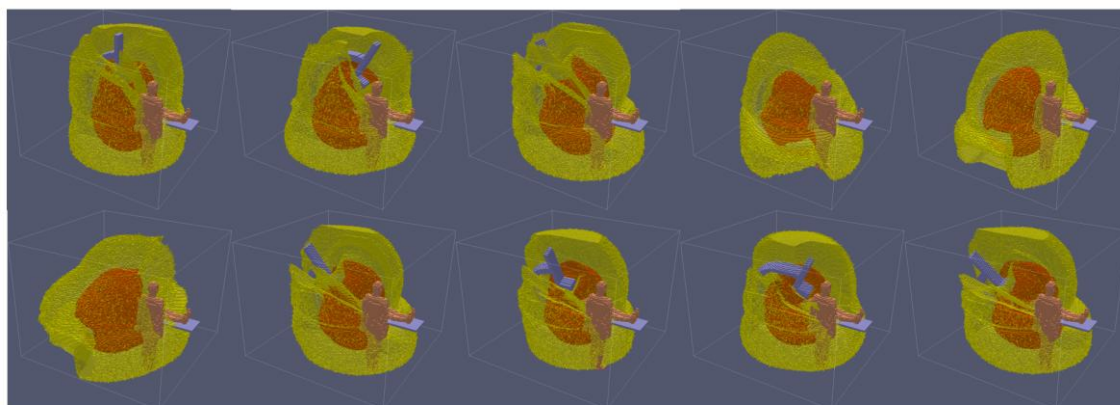
Figure.6 XY 断面の床から 95 cm のアイソセンタの位置での断面



a	b	c	d	e
f	g	h	i	j

a.PA b.CAU30 c.CRA30 d.LAO45CRA25 e.LAO60
f.LAO60CAU25 g.RAO15CRA30 h.RAO30 i.RAO30CAU30 j.RAO30CRA30

Figure.7 アイソセンタから患者の足側に 75 cm の位置での断面



a	b	c	d	e
f	g	h	i	j

a.PA b.CAU30 c.CRA30 d.LAO45CRA25 e.LAO60
f.LAO60CAU25 g.RAO15CRA30 h.RAO30 i.RAO30CAU30 j.RAO30CRA30

Figure.8 3次元散乱線分布

C.2 術者の位置での放射線防護具の遮蔽効果の検証

放射線防護具の遮蔽効果の結果を示した。まず、防護有の PA における線量プロファイルを図 9 に示した。図より、放射線感受性が高い生殖腺があるあたりの 80 cm 前後では防護カーテンにより大幅に線量が低減していた。また、水晶体の位置がある 160 cm の位置では PA 条件と PA_tube side 条件はあまり変わらず、約 17 %の低減だった。しかし、PA_physician side 条件では約 95 %の低減しており、防護板を術者に近づけて設置した方が大きな防護効果が見られた。PA_tube side 条件のように隙間があると、あらゆる角度から散乱線が入ってきて、このような結果となる。また、放射線防護具を付けた際に放射線防護具がない時より、全体的に線量が下がっているが、術者の位置での 90cm、120cm、150cm のあたりでは線量が高くなっていた。

次に防護有の LAO60 における線量プロファイルを図 10 に示した。放射線感受性が高い生殖腺があるあたりの 80 cm 前後では防護カーテンにより大幅に線量が低減しているのが分かる。また、水晶体の位置がある 160 cm の位置では LAO60 条件と比べて LAO60_tube side 条件は約 47 %低減した。LAO60_physician side 条件では約 97 %の低減しており、防護板を術者に近づけて設置した方が大きな防護効果が見られた。そのため、意識的に放射線防護板を近づけることで散乱線漏洩を減らすことができる。

PA 条件における術者の位置での 3 点の上昇に関わる様々な 2 次元断面を図 11 に示した。図 11 の a,d に寝台に平行かつ術者の位置を通る断面を示した。これより、図 9 の 90 cm の位置での

線量の上昇は放射線防護板と防護カーテンの隙間によるものだと考えられる。次に図 11 の b,e にアイソセンタと術者の位置を通る断面を示した。患者から外側に 2 本の線が伸びている。これは、防護板と患者の隙間からもれた散乱線を示す。この散乱線で図 9 の 120 cm と 150 cm の位置での線量の上昇につながる事が分かった。そして、図 11 の c,f と本研究で使用した人体ファントムより、150 cm の位置による線量は患者の腰と腕の隙間よりもれた散乱線とみられる。

続いて、図 12 に防護具をつけた際の PA、LAO 60 条件の床から 95 cm の術者の位置での 2 次元断面、図 13 に同様に防護具をつけた際の PA、LAO 60 条件の床から 160 cm の術者の位置での 2 次元断面、図 14 に防護具を付けた際の PA、LAO 60 条件の YZ 断面のアイソセンタから患者の足側に 75 cm の位置での 2 次元断面を示した。図 12.13.14 より、適切な放射線防護具の配置とともに角度による散乱線分布の広がりが見られた。PA、LAO60 条件ともに防護板の位置によって、術者の位置での線量が変化した。防護板を術者により近づけることで術者の位置での線量が低減されている。これは、防護板と術者の間に距離があることで、様々な方向から散乱線が到達してしまうことを示す。そのため、術者にできる限り近くに置くことによって、高い放射線防護対策ができる。そして、図 14 より術者の水晶体の位置より、足側の線量が後方散乱によって高くなっていた。しかし、散乱線源と術者の間に防護カーテンを置いたことにより、高い防護効果が見られた。

図 15 に PA_tube side 条件と PA_physician side 条件の 3 次元散乱線分布を示した。図 15 より、様々な視点から散乱線の広がりや防護具によ

る散乱線分布の広がり抑制を確認することができた。術者の足側は防護カーテンによる高い防護効果があると分かった。防護板については術者の水晶体の位置での PA_tube side 条件と比べて、PA_physician side 条件で高い防護効果がみられた。

図 16 に PA 条件の患者の心臓と術者を通る断面における 4 次元散乱線分布から得られた結果を示す。X 線照射から 8 ns まで 1 ns ごとの結果を 2 次元断面図として示した。図 16 より、散乱線分

布の時系列での広がり方を見ることが可能である。ここでは患者の心臓と術者を通る断面においての時系列を示している。スケールは 2 次元断面と同様に $5\text{--}500[\mu\text{Sv/Gy}]$ としている。これより、X 線管から放出した放射線は患者や寝台に当たり、患者による後方散乱が術者に影響を与えていた。そして、術者の頭側より足側に散乱線分布が広がっており、散乱線源を中心に広がっているのが見られた。

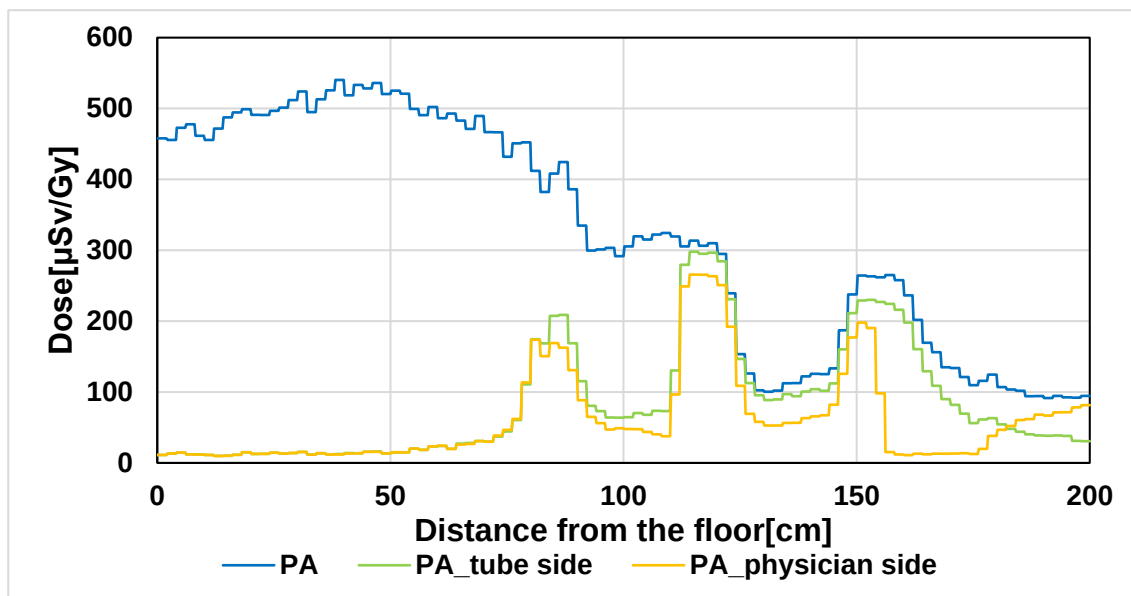


Figure.9 防護有の PA における線量プロファイル

縦軸は患者照射基準点を基準とした際の術者の位置での周辺線量当量を示し、横軸は術者の位置での床から 200 cm までの高さを示した。PA、PA_tube side、PA_physician side の 3 種類の条件で比較を行った。

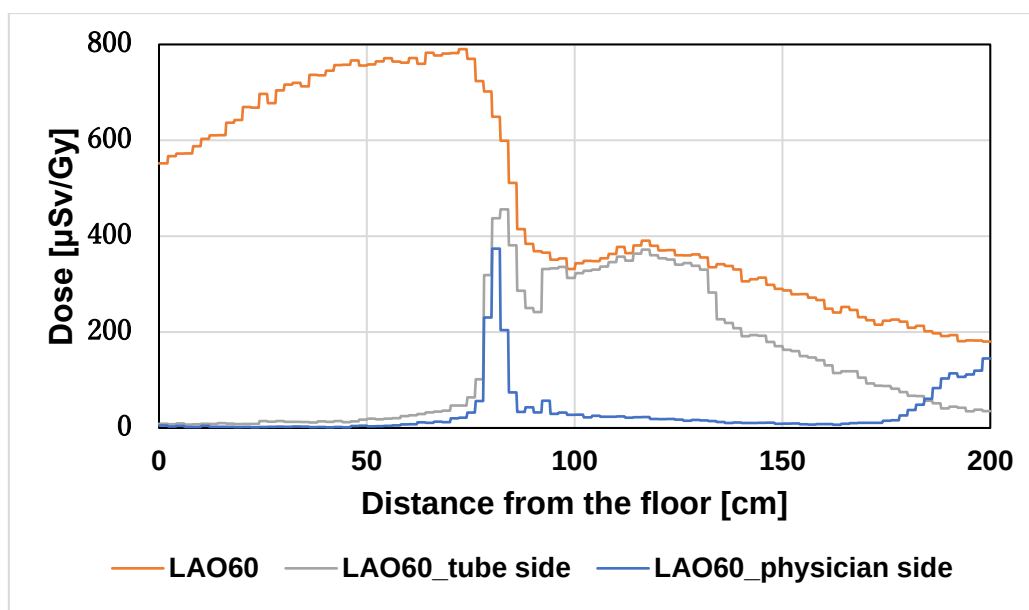


Figure.10 防護有の LAO60 における線量プロファイル

縦軸は患者照射基準点を基準とした際の術者の位置での周辺線量当量を示し、横軸は術者の位置での床から 200 cm までの高さを示した。LAO60、LAO60_tube side、LAO60_physician side の 3 種類の条件で比較を行った。

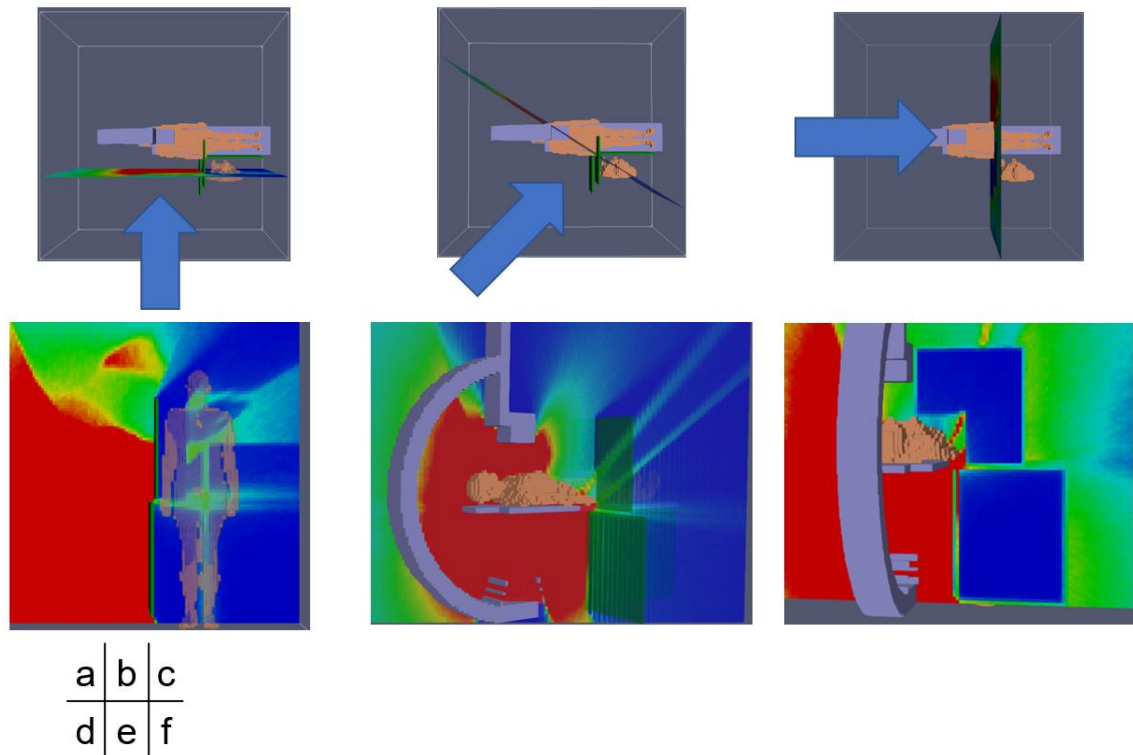
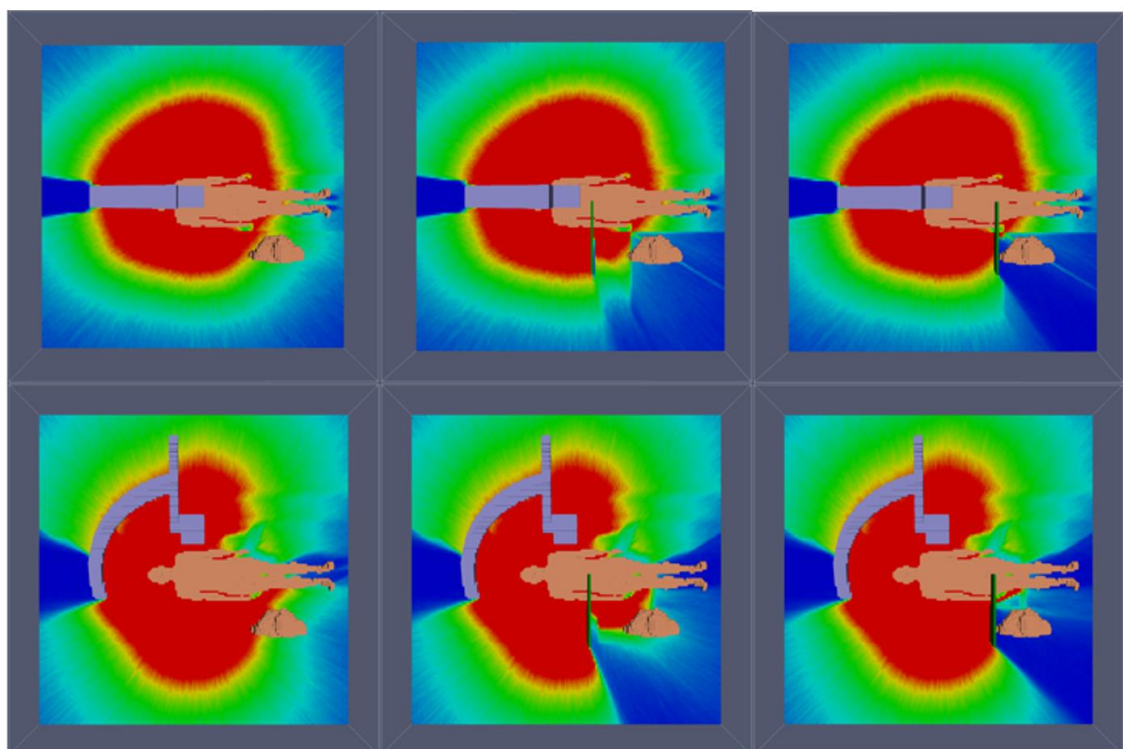


Figure.11 様々な 2 次元断面の表示

(a)天井から見て寝台に平行かつ術者の位置を通る 2 次元断面の位置 (b)天井から見てアイソセンタと術者を通る 2 次元断面の位置 (c)天井から見て放射線防護板と同じ位置のアイソセンタと術者を通る 2 次元断面の位置 (d) 天井から見て寝台に平行かつ術者の位置を通る 2 次元断面 (e)天井から見てアイソセンタと術者を通る 2 次元断面 (f)天井から見て放射線防護板と同じ位置のアイソセンタと術者を通る 2 次元断面



a	b	c	a. PA	b. PA_tube side	c. PA_physician side
d	e	f	d. LAO60	e. LAO60_tube side	f. LAO60_physician side

Figure.12 防護具をつけた際の PA、LAO 60 条件の床から 95 cm の術者の位置での 2 次元断面
 防護具をつけた際の床から 95 cm の術者の位置での 2 次元断面上段に PA、下段に LAO60 の防護無し、
 防護有の 2 次元断面を示した。カラースケールは 5 - 500[μ Sv/Gy]とした。

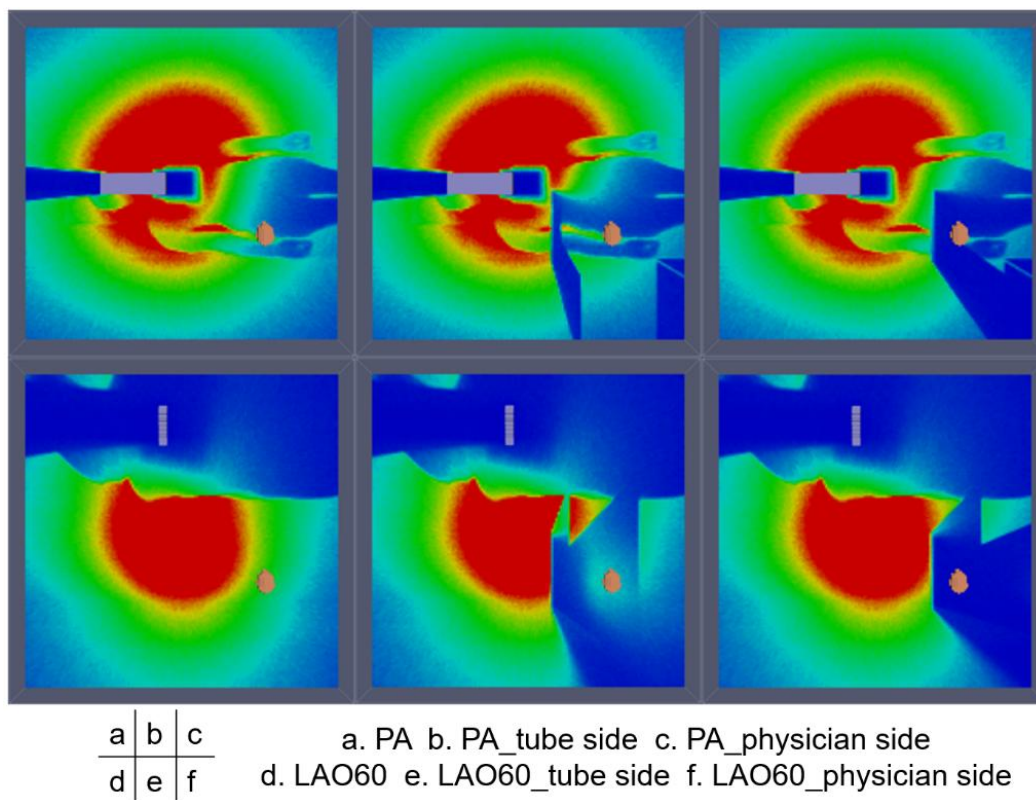


Figure.13 防護具をつけた際の床から 160 cm の術者の位置での 2 次元断面
 上段に PA、下段に LAO60 の防護無し、防護有の 2 次元断面を示した。カラースケールは 5 - 500[μ Sv/Gy]
 とした。

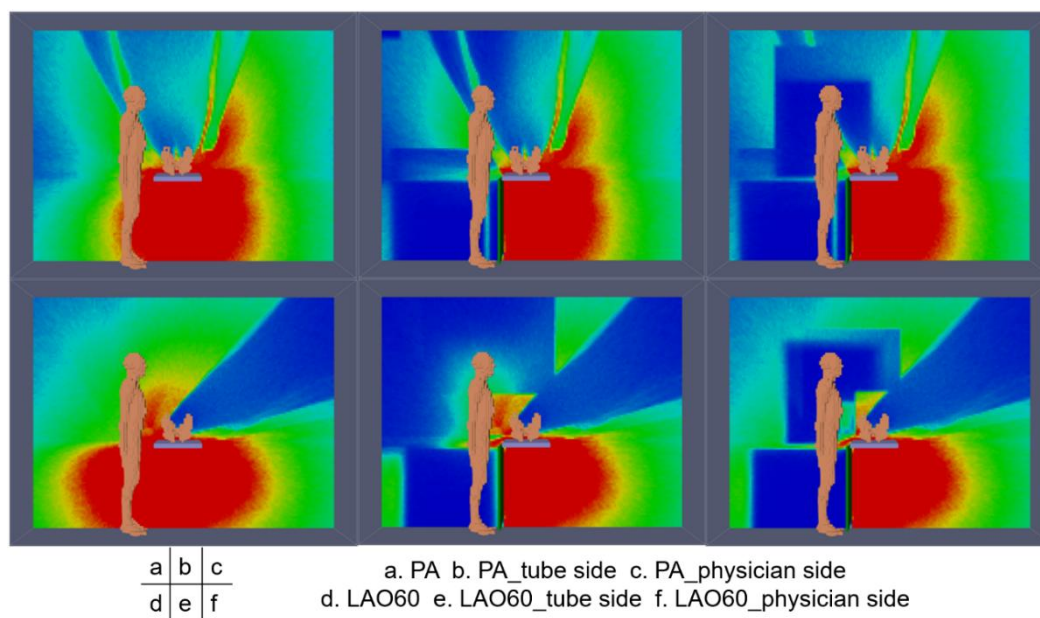


Figure.14 防護具をつけた際の YZ 断面のアイソセンタから患者の足側に 75 cm の位置での 2 次元断面
 上段に PA、下段に LAO 60 の防護無し、防護有の 2 次元断面を示した。カラースケールは 5 - 500[μ Sv/Gy]
 とした。

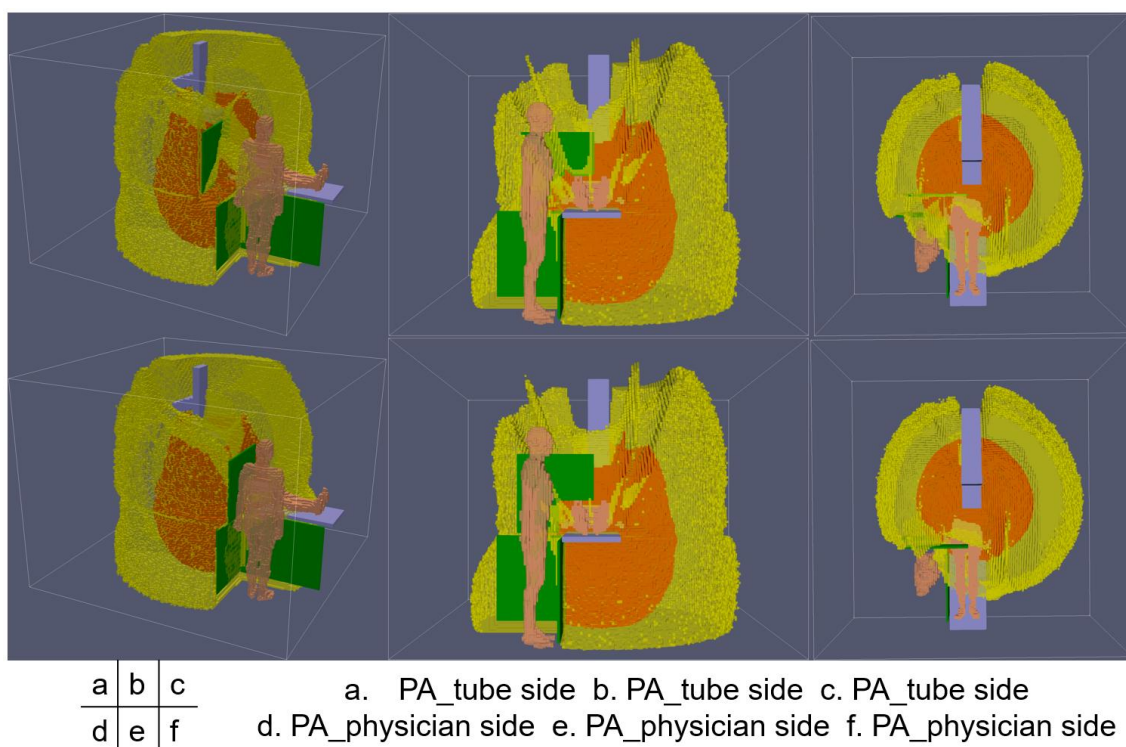


Figure.15 防護具をつけた際の3次元散乱線分布

上段に PA_tube side 条件、下段に PA_physician side 条件の3次元散乱線分布を示した。

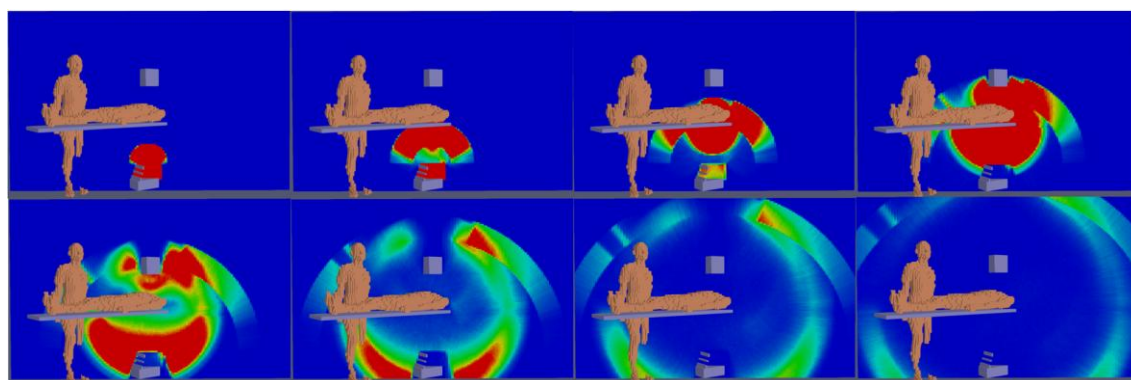


Figure.16 患者と術者を通る断面における4次元散乱線分布

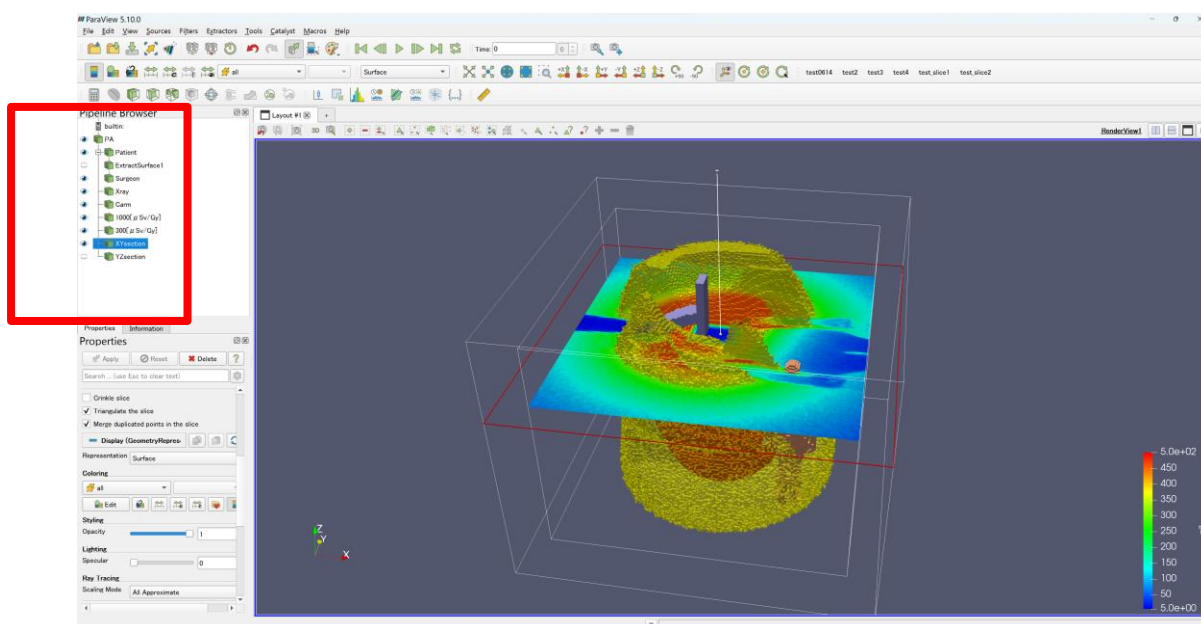
防護具なしのPAにおける放射線がX線管から放出されてから、8nsまでの変化を1nsごとに追った挙動を左上から順に示した。

C.3 ParaView

方法の2.1と2.2の条件では表示をParaViewで行った。図17にParaViewの操作画面を示した。ParaViewのアプリケーションを開き、表示したい.VTKファイルを入れることで図17のような画面を見ることができた。3.1や3.2で紹介したようにこのParaViewでは線量プロファイル、2次元断面、3次元散乱線分布、4次元散乱線分布を表示することができた。線量プロファイルからはある特定の位置の患者照射基準点を基準とし

た際の周辺線当量の数値をみることができた。2次元断面、3次元散乱線分布、4次元散乱線分布ではカラースケールや透明度で表示や変更、異なる条件の表示に関しては同画面上で表示することもできるため、自分自身が見易いように設定が可能である。図の左側にある赤枠は表示物であり、画面上に表示したいものを任意に選択することができ、また、追加したい表示物があった際はいつでも作成することが可能であった。

Figure.17 ParaView の操作画面



C.4 ParaViewGlance

図 18 に ParaViewGlance の操作画面を示した。図より、Web ブラウザ上で操作できていることが分かった。図の左側にある赤枠は表示物である。ParaView と同様に画面上に表示したいものを任意に選択することができ、様々な視点から表示物を確認できた。また、図のようにマルチディスプレイ表示が可能である。この ParaViewGlance では事前に ParaView で設定して作成した VTK.JS

ファイルを用いて、2 次元断面や 3 次元散乱線分布を Web ブラウザ上で表示することができた。ParaView と同様にカラスケールや透明度の変更や同画面上での異なる条件の表示も行うことができた。また、術者の右上に患者照射基準点を基準とした際の術者の水晶体の位置での周辺線量当量が表示された。これより、素早く線量を確認することが可能である。

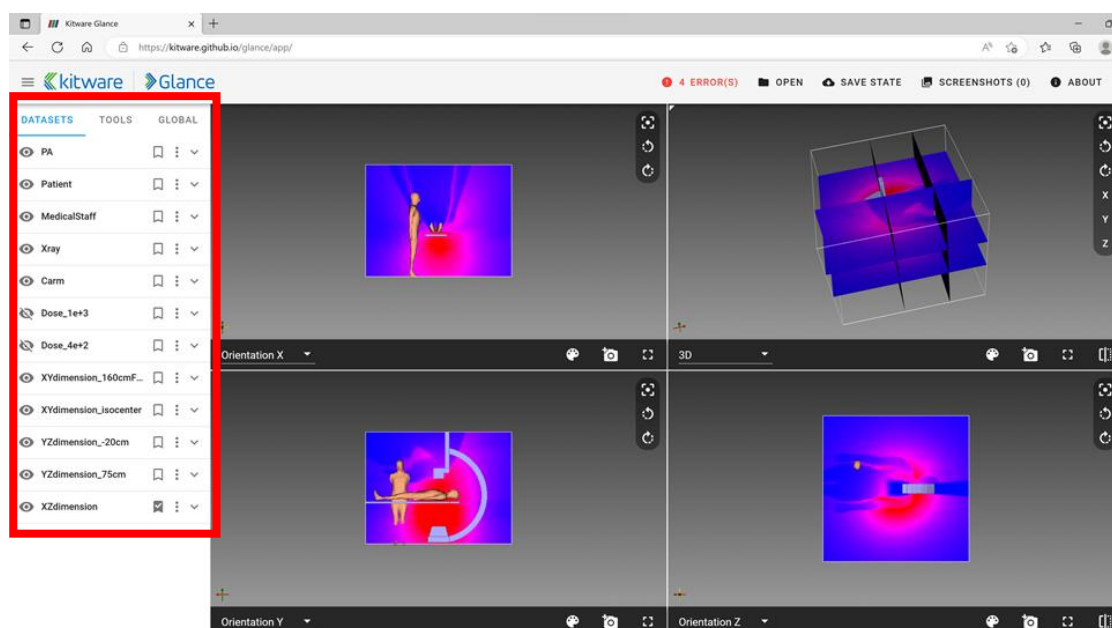


Figure.18 ParaViewGlance の操作画面

左側の赤枠は表示物を示している。

C.5 ParaViewLite

図 19 に ParaviewLite の操作画面を示した。図より、Web ブラウザ上で操作できていることが確認できた。また、特定のファイルを開くためには画面上にある file より、表示したい.VTK ファイルとそれに対応した PVSM ファイルを開く必要がある。その時に上手く表示されないこともあるが、リロードを行うと、表示したい条件の散乱線分布を見ることができた。先ほどと同様に図の左側の赤枠は表示物である。これより、画面上に任意に表示物を選択することが可能である。また、

表示したものの色や透明度も変更することができ、ParaView や ParaViewGlance と同様に様々な視点から表示物を確認できた。この ParaViewLite では ParaView と同様に 2 次元断面を任意で選択し、様々な位置の断面を観察することができた。図 14 の左下の青枠は二次元断面の位置を操作するスケールバーである。これ以外にも数値入力によって動かすことや XZ 断面から XY 断面と任意の断面に変更することもでき、自分自身が見易いように設定ができた。

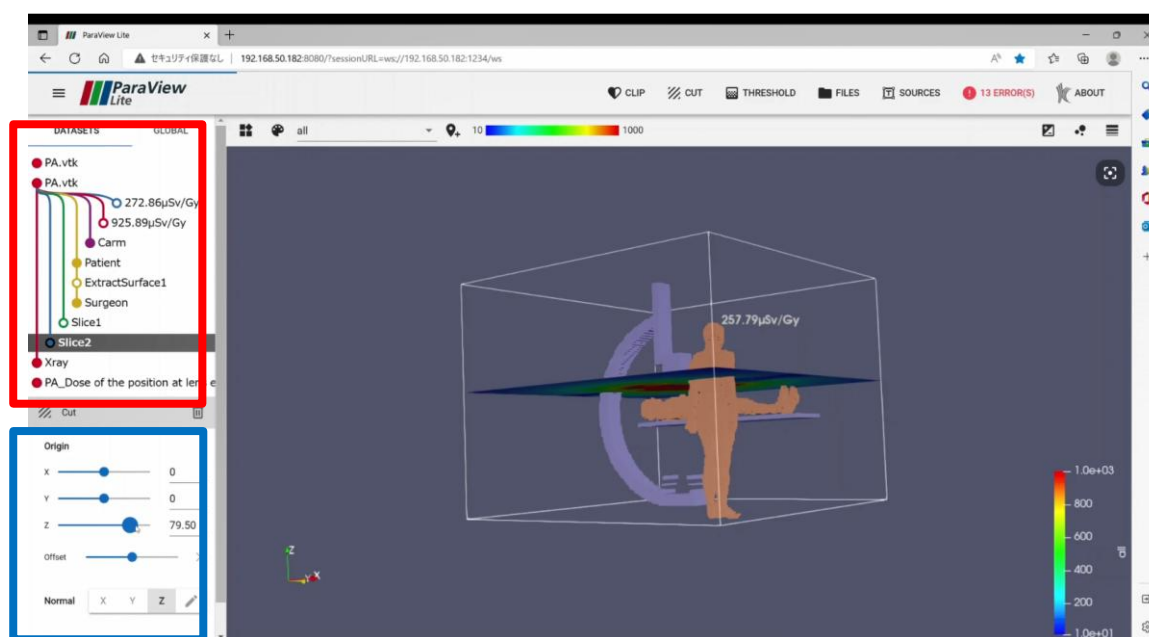


Figure.19 ParaViewLite の操作画面

左側の赤枠は表示物を示している。その下にある青枠は 2 次元断面のスケールバーを示している。

C.6 可視化の表示ツールによる比較

本研究では 3.3 - 3.5 の 3 つの表示ツールによる可視化を行った。3 つの可視化の表示ツールの特徴を表 4 に示した。

まず、ParaView、ParaViewGlance、ParaViewLite の 3 つの可視化の表示ツールに関する共通点を示した。それは 2 次元断面や 3 次元散乱線分布の表示が可能なことであり、これによるカラースケールや透明度の変更を行うことができた。また、画面上に表示したいものを任意に選択でき、様々な視点から表示物を確認することができるため、自分自身が見易いように設定することができた。異なる条件の表示に関しては同画面上で表示することができるため、他の条件との

比較がしやすいという点があった。これより、どの表示ツールも様々な視点移動や散乱線分布に対して見やすいように設定ができるという共通事項があると分かった。

次にそれぞれの可視化の表示ツールに関する特徴を下記に示した。ParaView は本研究で紹介した表示ツールの中で唯一インストールしなければならないアプリケーションである。そのため、使用者が持っているデバイスの OS が全て対応しているとは限らないことが欠点としてあげられる。また、装置や分布を表示する際の設定が複雑という点もあるが、線量プロファイルから 4 次元散乱線分布と様々な可視化表示ができることや追加したい表示物や分布があった際はすぐに作

成し、表示することができるという利点もある。

続いて、ParaViewGlance についてである。この表示ツールが ParaView と大きく異なる点は Web ブラウザ上で操作するものか、アプリケーションで操作するものかということである。ParaViewGlance は ParaView と異なり、Web ブラウザ上で操作ができた。ほかの利点としては、マルチディスプレイ表示が可能であり、また、ParaView のように複雑な操作がなく、表示の切り替えのみでみることができ、ParaViewLite よりも簡易的で分かりやすい点あげられる。そのため、特定の散乱線分布のみの表示しかできず、また、2次元断面に関しては ParaView と異なり、事前に設定した断面しか表示することができないことが欠点としてあげられる。また、ここで使用される VTK.JS ファイルは ParaView で作成しなければならないいけないということも欠点としてあげられる。

最後に ParaViewLite についてである。これが ParaView と異なることは ParaViewGlance と同

様にアプリケーションではなく、Web ブラウザ上での操作が可能なことである。また、ParaViewLite が ParaViewGlance と異なることは ParaView と同様に VTK ファイルを用いるため、2次元断面において任意の断面を表示することが可能である。2つの表示ツールの利点を持っているため、誰でもブラウザ上で使用者自身が見易いように ParaView と同様の機能である任意の2次元断面を表示でき、表示の切り替えのみでみる事が可能である。しかし、この欠点としては ParaViewGlance と同様に PVSM ファイルを ParaView で作成しなければいけないということに加えて、この作成を ParaViewLite が搭載されている PC で作成しなければならない点がある。また、現時点ではセキュリティの問題により、アクセスできる範囲を制限している。そのため、使用範囲が限られることが欠点としてあげられる。しかし、セキュリティ対策を行うことで使用範囲が広がると考えられる。

Table.4 表示ツールの特徴

	ParaView	ParaViewGlance	ParaViewLite
共通事項		・2次元断面、3次元散乱線分布の表示可能 ・カラースケールや透明度の変更可能 ・画面上に表示したいものを任意に選択可能 ・様々な視点から観察可能 ・同画面で異なる条件を表示可能	
長所	・線量プロファイル、4次元散乱線分布の表示可能 ・任意の2次元断面、3次元散乱線分布の表示 ・表示物の追加	・Web ブラウザ ・簡易的な操作 ・即座に表示可能 ・マルチディスプレイ可	・Web ブラウザ ・任意の2次元断面の表示 ・即座に表示可能
短所	・インストールが必要 ・装置や分布を表示する際の設定が複雑	・特定の2次元断面や散乱線分布やの表示 ・事前に表示したい VTK. JS ファイルの作成	・事前に表示したい PVSM ファイルの作成 ・搭載されている PC 上での作成 ・使用範囲の制限

D. 考察

D.1 様々な C アーム角度の透視条件

角度別の散乱線分布について、術者の位置のアイソセンタや水晶体の高さでは、RAO 方向よりも LAO 方向の方の線量が高かった。これについては3点の要因が考えられる。1点目は X 線管からの漏れ線量である。LAO 方向の X 線管が

術者に近く、RAO 方向よりも影響を受けやすい。2点目は散乱線の発生源に近いことである。先ほどと同様に LAO 方向のほうが術者側に X 線があたりやすい。そして、3点目は患者による減弱の影響である。多くの図にある患者による減弱の影響より、術者の水晶体の位置での LAO 方向はその影響を受けていないため、線量が高か

ったとみられる。

また、グラフより、120 cm 以降で LAO 60 や LAO 60CAU 25 条件は線量が低下しており、これは散乱線源から離れて散乱線が減弱していることによると考えられる。反対に、PA や CAU 30 ではある位置で急激に線量が高くなった。これは、図 5 の a,b より、術者の位置では患者から発生した散乱線が患者の腹部と腕の間を通り、その患者による減弱効果がない場所だったため、このような結果になったと考えられる。様々な C アーム角度によって、散乱線分布だけでなく、患者による減弱の位置も変化する。また、線量プロファイルからも術者の足側の線量が高かった。そのため、1 角度だけでなく、様々な C アーム角度における散乱線分布を把握し、立ち位置や放射線防護具の使用方法を考えるべきだと考えられる。

D.2 術者の位置での放射線防護具の遮蔽効果の検証

放射線防護具の設置によって、放射線防護具がない状態より、術者の位置での線量が低減した。主に術者の足側は防護カーテン、術者の水晶体の位置では放射線防護板により散乱線が遮蔽された。また、本研究で PA と LAO 60 条件の 2 種類で行ったが、どちらともに放射線防護具による高い防護効果が見られた。これより、どの角度においても放射線防護具による効果があるといえる。しかし、放射線防護効果をより高めるには「隙間」が重要である。放射線防護板を術者の近くに置き、できる限り放射線防護板と術者との隙間をなくすこと。これに加えて、これらの隙間も重要である。図 11 より、放射線防護板と防護カーテンによる隙間や放射線防護板と患者による隙間も術者に対して影響を与えると分かった。そのため、放射線防護板の下に防護カーテンがついているものや放射線防護板を患者に近づけるなどの対策がより高い防護効果につながると考えられる。

D.3 可視化表示による意義

本研究では様々な可視化表示を行って、放射線防護対策を示した。これらの意義を下記に示した。

まず、線量プロファイルの利点については他の角度や条件との比較が容易であることや実測では難しい線量の数値が詳細に分かることがあ

げられる。しかし、図 9.10 の線量プロファイル結果であったようになぜこのようなプロファイルになったのかという理由を得るのは難しい。その時に用いるのが 2 次元断面である。これでは先ほどのように線量プロファイルを調べる際の任意断面表示や今回の術者とは異なる位置にいるときの線量指標を分布として容易に得ることができる。また、3 次元散乱線分布では立体表示であり、多方向から散乱線分布の広がりを素早く把握することができる。そのため、どのあたりの線量が高いのか、隙間があれば、どのくらいの散乱線が広がっているのかを理解することができる。しかし、これらの広がりほどの位置から広がってきたものかは分からない。そこで、4 次元散乱線分布である。ここでは分布に加えて、時系列があるため、方向をみることができる。そのため、どの位置から広がった散乱線かを把握することができる。

これらの散乱線分布や断面を可視化表示し、組み合わせることでの位置が危険なのか、素早く判断、把握することが可能と考えられる。

D.4 可視化の表示ツールによる比較

3.6 にそれぞれの可視化表示ツールに関する特徴を示し、そこから考えられるどのような状況下で使用するべきかを下記に示した。

ParaView は様々な可視化表示ができる一方、操作が複雑かつインストールしなければならないため、一般向けには使用が難しいと考えられる。そのため、細かい解析を行うような研究者に向いている表示ツールだと思われる。

続いて、ParaViewGlance は Web ブラウザ上で操作ができるため、使用者が限定されず、多くの人に使用してもらうことが可能である。欠点として、VTK. JS ファイルの作成があげられていたが、この点については事前に必要とされるような条件による散乱線分布を用意しておくことで、気軽に使用者が使いやすくなると考えられる。これより、誰もが簡単にアクセスすることが可能な Web ブラウザ上においてボタン一つでマルチディスプレイ表示ができるなどと簡易的な操作が使用できる表示ツールのため、散乱線分布の広がりをすぐに確認したい人に向いている表示ツールだと考えられる。

最後に ParaViewLite についてである。ParaViewGlance と同様に PVSM ファイルを ParaView で作成しなければいけないというこ

とに加えて、この作成を ParaViewLite が搭載されている PC で作成しなければならないという欠点があるが、これについては大変難しいため、事前に必要とされるような条件による散乱線分布を用意しておくことで、気軽に使用者が使いやすくなると考えられる。また、使用範囲が制限されるが、Web ブラウザ上で任意の 2 次元断面を見ることができるという利点がある。これより、大学内等の ParaViewLite の使用範囲内の人かつ詳細な広がりを見たい人に向けている表示ツールだと考えられる。

以上より、それぞれの表示ツールの特徴を理解し、使用者自身が表示したいものや使用している環境を考慮し、選択することが重要であると考えられる。

E. 結論

本研究では、モンテカルロシミュレーションコード PHITS と可視化のためのアプリケーション ParaView を用いて、血管造影検査室内の散乱線分布を表示した。それによって、様々な C アーム角度や放射線防護具による線量プロファイル、2 次元断面、3 次元散乱線分布、4 次元散乱線分布を得た。それぞれの表示方法には特徴があるため、それを理解することが大切である。そして、これらの可視化表示を組み合わせ、把握することで散乱線分布の広がり、方向を理解し、どの位置で操作すべきか、どのように放射線防護具を配置すべきかを考えることができる。同様に表示ツールもそれぞれの特徴を理解し、使用者自身の環境を考慮し、選択することが大切である。

F. 参考文献

- 1: International Commission on Radiological Protection. ICRP Statement on Tissue Reactions and Early and Late Effects of Radiation in Normal Tissues and Organs-Threshold Doses for Tissue Reactions in a Radiation Protection Context. ICRP Publication 118. Ann ICRP 2012; 41(1-2).
- 2: International Commission on Radiological Protection. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. Ann. ICRP 37 (2-4).
- 3: International Commission on Radiological Protection. Education and Training in Radiological Protection for Diagnostic and Interventional Procedures. ICRP Publication 113. Ann ICRP 2009; 39(5).
- 4: International Commission on Radiological Protection. Radiological protection in cardiology. ICRP Publication 120. Ann ICRP 2013; 42(1).
- 5: Miller DL, Vañó E, Bartal G, et al. Occupational radiation protection in interventional radiology: a joint guideline of the Cardiovascular and Interventional Radiology Society of Europe and the Society of Interventional Radiology. Cardiovasc Interv Radiol. 2010 Apr;33(2):230-9.
- 6: International Commission on Radiological Protection. Recommendations of the ICRP. ICRP Publication 26. Ann ICRP 1997;1(3).
- 7: Sukupova L, Hlavacek O, Vedlich D. Impact of the Ceiling-Mounted Radiation Shielding Position on the Physician's Dose from Scatter Radiation during Interventional Procedures. Radiol Res Pract. 2018 Jan.
- 8: Jia Q, Chen Z, Jiang X, et al. Operator Radiation and the Efficacy of Ceiling-Suspended Lead Screen Shielding during Coronary Angiography: An Anthropomorphic Phantom Study Using Real-Time Dosimeters. Sci Rep. 2017 Feb 7;7:42077.
- 9: Abdul Aziz MZ, Yani S, Haryanto F, Ya Ali NK, Tajudin SM, Iwase H, et al. Monte Carlo simulation of X-ray room shielding in diagnostic radiology using PHITS code. Journal of Radiation Research and Applied Sciences. 2020;13,1,704-713.
- 10: Nishi K, Fujibuchi T, Yoshinaga T. Development of an application to visualize the spread of scattered radiation in radiography using augmented reality. 2020 J. Radiol. Prot 40, 1299-1310.
- 11: Shimizu S, Arakawa H, Honda J, Tokumori K and Fujibuchi T. Visualization of Scattered Radiation Distribution under Various X-ray Room Conditions in Medical Facilities and Development of Its Display Tool. Japanese Journal of Health Physics. 2021;56(4),315-323.
- 12: Matsumoto-Kawaguchi E, Sakama M, Fujimoto K and Ikushima H. Dose

- Assessment on the Mean Absorbed Estimates Derived from the Simple Approach Method Applying Marinelli-Quimby's Formula for Ambient Risk Organs to Thyroid Uptake in the Administered ^{131}I Radiopharmaceutical of Graves' Disease Using PHITS and ICRP Reference Computational Voxel Phantom. *Radiation Environment and Medicine*. 2021, Volume 10, Issue 2, 87-95.
- 13: Guo C, Xiong Z, Vijayan S, Rudin S, Bednarek DR. Developing a database of 3-D scattered radiation distributions for a c-arm fluoroscope as a function of exposure parameters and phantom. *Proc SPIE Int Soc Opt Eng*. 2018 Feb;10573:1057360.
 - 14: Roh Y, Kim J, Park H, Kim J, Ryu D, Chun K, Seo J, Lee B, Cho B, Yoon Y. Effect of Exposure Angulation on the Occupational Radiation Exposure during Cardiac Angiography: Simulation Study. *Int J Environ Res Public Health*. 2021 Jul 30;18,8097.
 - 15: Santos WS, Neves LP, Perini AP et al. Exposures in interventional radiology using Monte Carlo simulation coupled with virtual anthropomorphic phantoms. *Phys Med*. 2015 Dec;31(8):929-933.
 - 16: Kilian-Meneghin J, Xiong Z, Guo C, Rudin S, Bednarek DR. Evaluation of Methods of Displaying the Real-Time Scattered Radiation Distribution during Fluoroscopically-Guided Interventions for Staff Dose Reduction. *Proc SPIE Int Soc Opt Eng*. 2018 Feb;10573:1057366.
 - 17: Matsuzaki S, Moritake T, Morota K, et al. Development and assessment of an educational application for the proper use of ceiling-suspended radiation shielding screens in angiography rooms using augmented reality technology. *Eur J Radiol*. 2021 Oct; 143: 109925.
 - 18: Nowak M, Carbonez P, Krauss M, Verdun FR, Damet J. Characterisation and mapping of scattered radiation fields in interventional radiology theatres. *Sci Rep*. 2020 Oct 30;10(1):18754.
 - 19: Kuon E, Dahm JB, Empen K, Robinson DM, Reuter G, Wucherer M. Identification of less-irradiating tube angulations in invasive cardiology. *J Am Coll Cardiol*. 2004 Oct 6;44(7):1420-8.
 - 20: Fujibuchi T, Ueda K, Kadayanagi S, Ueno D and Nakamura C. Examination of Application to Radiation Protection Education by Four-dimensional Visualization of Scatter Distribution in Radiological Examination Using Virtual Reality. 2019 *Jpn. J. Radiol. Technol*. 75(11), 1297-1307.
 - 21: J. Ahrens, B. Geveci, C. Law, Paraview: An end-user tool for large data visualization. *Visualization Handbook*, 2005.
 - 22: Sato T, Iwamoto Y, Hashimoto S, Ogawa T, Furuta T, Abe S, Kai T, Tsai P, Matsuda N, Iwase H, Shigyo N, Sihver L and Niita K. Features of Particle and Heavy Ion Transport code System (PHITS) version 3.02. 2018 *J. Nucl. Sci. Technol* 55(5-6), 684-690.
 - 23: Sato N, Fujibuchi T, Toyoda T, Ishida T, Ohura H, Miyajima R, et al. Consideration of the Protection Curtain's Shielding Ability after Identifying the Source of Scattered Radiation in the Angiography. *Radiat Prot Dosimetry*. 2017 Jun;175(2):238-245.
 - 24: International Commission on Radiological Protection. Adult Reference Computational Phantoms. ICRP Publication 110. *Ann ICRP* 2009;39(2).
 - 25: International Commission on Radiological Protection. Conversion Coefficients for use in Radiological Protection against External Radiation. ICRP Publication 74. *Ann. ICRP* 1996;26 (3-4).
 - 26: 加藤秀起. 診断領域 X 線スペクトル近似計算ソフト X-ray-Spectrum. Available at: <https://hidekikato1952.wixsite.com/radiotechnology> (accessed 2023/01/13).
 - 27: ParaView. <https://www.paraview.org/> (accessed 2021-10-25).
 - 28: ParaViewGlance. <https://kitware.github.io/glance/> (accessed 2023/01/13).
 - 29: Metasequoia. <https://www.metaseq.net/jp/> (accessed 2022-3-2).
 - 30: ParaViewLite. <https://kitware.github.io/paraview-lite/index.html> (accessed 2023/01/13)

31: ParaViewLite.
http://192.168.50.182:8080/?sessionURL=ws (accessed
2022/11/23)

G. 健康危険情報
なし

H. 研究発表
1. 論文発表

1. Fujibuchi T, Nakashima M, Arakawa H, Miyazaki H, Anam C. Evaluation of radiation protection effectivity in a cardiac angiography room using visualized scattered radiation distribution. J Radiol Prot., 44, 031510, 2024

2. 学会発表

1: Misaki Nakashima, Toshioh Fujibuchi,

Kazuki Nishi. Consideration of Method for Displaying 3D Scattered Radiation Distribution in Angiography Room using Web Browser. The 78th annual meeting of the JSRT, Yokohama, April 14-17, 2022.

2: 中嶋美沙希, 藤淵俊王, 荒川弘之, 宮崎仁志. Web ブラウザで動作する血管造影検査室内の散乱線分布表示による防護教材の構築. 第4回日本保健物理学会・日本放射線安全管理学会合同大会, Fukuoka, November 24-26, 2022.

H. 知的財産権の出願・登録状況
(予定を含む。)

1. 特許取得
なし

2. 実用新案登録
なし

3. その他
なし

労災疾病臨床研究事業費補助金
総合（令和4年度～令和6年度）分担研究報告書
デジタルトランスフォーメーションを活用した医療従事者の被ばく低減プログラム
の開発と有効性の検証（220201）

WebVRによる血管造影での放射線防護教育教材の開発

研究分担者 藤淵 俊王 九州大学大学院医学研究院保健学部門医用量子線科学分野 教授

研究要旨

近年、血管造影検査の需要が増加しているが、技術の難易度が高く、長時間の透視や頻回する確認撮影により被曝線量の増大が懸念され、医療従事者への放射線防護強化の必要性が高まっている。

本研究の目的は、WebVRを用いた散乱線の可視化及び有効な放射線防護についての教材の作成である。Cアームの角度毎の散乱線分布の三次元的可視化、防護板と術者の位置関係による被ばく線量の変化、X線曝射時の時間経過を示した3DアニメーションのWebVRと、放射線防護教材として問題を作成した。WebVRの有用性として、条件の違いによる散乱線分布の変化を任意の視点から観察することができる点、PCのみでのVR体験が可能である点などが挙げられる。今後、放射線防護教育教材としての有用性を検証する必要がある。

またWebVRを用いたX線透視における散乱線分布の可視化及び放射線防護教材を開発した。仰臥位で寝台に寝ている患者に対してX線を照射した際のモンテカルロシミュレーションに基づくデータから、PC等で使用できるWebVRを用いた放射線防護教材を作成した。WebVRの有用性としてヘッドマウントディスプレイのような専用機器を必要とせず、PCがあれば誰でも使用できることが挙げられる。しかし現時点ではX線透視に携わる医療従事者からの放射線防護教材の有用性についての検討がなされておらず、今後課題点を克服した上で教材の使用における検討が必要である。

研究協力者

宇都宮 史子 九州大学医学部保健学科放射線技術科学専攻
川島 理愛 九州大学医学部保健学科放射線技術科学専攻

A. 研究目的

近年、血管造影の需要が増加しており、技術の難易度が高く手技が煩雑なため、長時間の透視や頻回する確認撮影により被曝線量の増大が懸念される。これは、放射線業務従事者の電離放射線による確定的影響や確率的影響の発生確率を高める危険性がある。また、術者における主な被ばく源は患者からの散乱線であるため、放射線防護において散乱線の挙動の理解が必要である。しかし、散乱線は目に見えないため、散乱線挙動の理解を行うことが難しい。血管造影検査において、医師、看護師、臨床工学技士、診療放射線技師といった様々な職種が従事

しているが、職種によって放射線についての基礎知識には差があるため、診療放射線技師が中心となって放射線防護教育を行うべきである。しかし、治療などの時間で放射線防護教育に十分な時間を取ることが難しく、放射線防護について理解が不十分である従事者も多い。ここで、WebVRとは、ウェブブラウザ上でVR(Virtual Reality)体験を行うことができる技術である。WebVR技術は、地学教材の開発、疑似津波訓練システムへの開発の他、オンラインイベントにて利用されている。WebVR技術は、仮想空間を利用するための端末と場所を選ばずに利

用できる上に、多局面を再現することができ、現実での訓練では用意しなければならない時間や空間などの制限を無視することができる。と考える。

本研究では、WebVR を用いて散乱線分布を三次元的に可視化し、散乱線の挙動の理解および有効な放射線防護についての教材を作成することで、PCI(Percutaneous Coronary Intervention; 経皮的冠動脈インターベンション)に携わる従事者の散乱線の挙動および防護についての教材の作成を目的とした。

また WebVR を用いて X 線透視検査時の散乱線の広がりや三次元的に可視化し、散乱線挙動の理解および有効な放射線防護法を考察するための教材を開発することを目的とした。ここで WebVR とは、ウェブブラウザ上で使用可能な VR (Virtual Reality: 仮想現実) 技術のことを指す。

B. 研究方法

B-1 Paraview による散乱線データの取得

まず、先行研究によって得られた、モンテカルロ計算コード PHITS で計算させた血管造影検査時における散乱線分布データを Paraview 5.11.1 によって 3D データ(obj 形式)で出力した。Paraview 5.11.1 は、三次元可視化ソフトウェアの一種であり、非常に大規模なデータセットの分析と可視化を可能にする 7)。散乱線分布データは、Caudal 25 °、Cranial 30 °、LAO(Left Anterior Oblique) 60 °、PA(Posterior-Anterior)、RAO(Right Anterior Oblique) 30 ° の 5 種類の C アームの角度で、防護具ありとなしの場合、それぞれ 10, 2, 1, 0.2 $\mu\text{Sv}/\text{mGy}$ の 4 種類の 3D データを使用した。

Paraview 5.11.1 によって出力した 3D オブジェクトは、表面の凹凸が目立ち、頂点数が多く、データ容量が大きい。データ容量が多い場合、WebVR 上の読み込み速度が遅くなり、動作が重くなる。そのため、Blender 3.6.111)を用いて、頂点数の削減及びスムージングを行うことで表面を平滑化し、データ容量を削減した。変化の大きいもので、6,549 キロバイトから 1,164 キロバイトと約 82 % の削減を行うことができた。また、色付け処理では、10 $\mu\text{Sv}/\text{mGy}$ を赤色、2 $\mu\text{Sv}/\text{mGy}$ を黄色、1 $\mu\text{Sv}/\text{mGy}$ を緑色、0.2 $\mu\text{Sv}/\text{mGy}$ は青色

とし、3D アニメーションで表示する 3D オブジェクトは赤色とした。線量分布の 3D データには透明度をつけた。

作成したシステムは、HTML および JavaScript によって構築され、平滑処理した 3D オブジェクト(glb 形式)を Web フレームワークである A-Frame を利用して Index.html に挿入することで WebVR を作成した。作成した WebVR については、XAMPP を用いてローカル環境に仮想サーバーを構築することで動作確認を行った。作成した WebVR は、角度毎の防護具がある場合とない場合の線量分布に関する WebVR、防護板の移動と術者の被ばく量の変化に関する WebVR、血管造影検査中の X 線曝射時の 3D アニメーションに関する WebVR である。各 WebVR について、ボタンを配置することで主要な 3D オブジェクトの表示と非表示を切り替えることが可能になった。また、簡単な操作説明画像(jpg 形式)を作成し、表示と非表示を切り替えられるようにした。また、WebVR を操作するために使用した機器は、Windows10 (8th Gen intel(R) Core(TM)i7-8550U @1.80GHz) の PC で、ブラウザは Google Chrome および Microsoft Edge を使用した。

開発した WebVR を基に、放射線防護教材を作成した。教材の内容は、遮蔽や防護板の使用方法についての問題とした。また、対象は血管造影検査に携わる医療従事者および診療放射線技師を目指す学生とした。作成した問題は 7 問で、角度毎の防護具がある場合とない場合の散乱線分布についての問題を 2 問、防護具移動と術者の被ばく量の変化についての問題を 3 問、血管造影検査中の X 線曝射時の 3D アニメーションについての問題を 2 問作成した。また、演習の流れは、対象者に各 WebVR および確認テストにアクセスできるページのリンクを配布し、WebVR を自由に操作し、最後に定着の確認のためにテストという形で問題を解くことを想定している。

B-2. 散乱線挙動の計算

先行研究において得られた、モンテカルロ計算コード PHITS v3.24 で計算させたデータを使用

した。PHITS は、あらゆる物質中での様々な放射線挙動を核反応モデルや核データなどを用いて模擬する。本研究で用いたデータの照射条件は、管電圧：87 kV 2.6 mmAl、SSD：120 cm、床から寝台までの距離：80 cm、防護カーテン：0.013 mmPb、防護カーテンの高さ：15 cm である。また、二次元散乱線分布の時間変化では、防護カー

テン無しの場合が 0 から 16 ナノ秒の間を 32 分割、防護カーテン有りの場合は 0 から 16 ナノ秒の間を 16 分割したデータを用いた。また照射野は 23 cm×23 cm で、防護カーテン無しの 3D オブジェクトのみ照射野が 10 cm×10 cm の場合のデータも使用した。

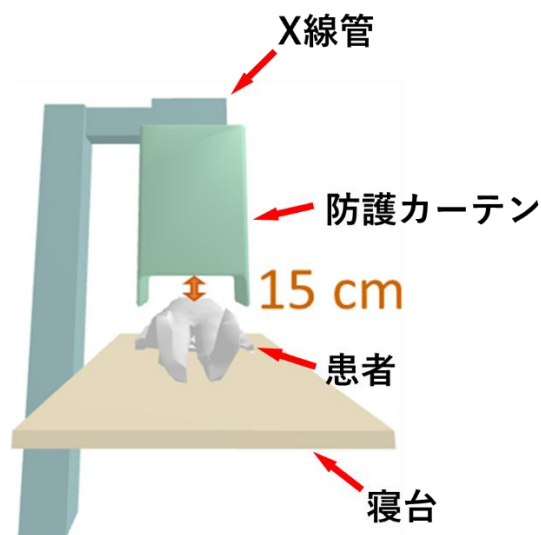


Fig. 1：防護カーテン有りの場合におけるシミュレーションの配置

計算で得られたデータを、ParaView version 5.10.1 を用いて、3 次元データ、2 次元データ、線量値として取得した。ParaView は、オープンソースのマルチプラットフォーム科学データ分析および可視化ツールで、非常に大規模なデータセットの分析と可視化を可能にする。

Metasequoia 483b によって、先ほどの三次元データに頂点数の削減と色付けという処理を行った。Metasequoia 4 は、ポリゴンベースのモデラーで、3DCG や 3D プリント、ゲーム向けの素材制作などに用いる立体形状データを作成した。本研究では頂点数の削減により平滑化とデータ容量の削減をした。データ容量の変化が一番大きいものでは、1397 キロバイトから 48 キロバイトと、96%以上削減した。これにより WebVR 上での読み込みが速くなるため、動作がスムーズに行えるようになる。色付け処理では、10 $\mu\text{Sv/mGy}$ を赤色、5 $\mu\text{Sv/mGy}$ を黄色、1 $\mu\text{Sv/mGy}$ を黄緑色、0.5 $\mu\text{Sv/mGy}$ を青色とした。

B-4. WebVR の開発

次にこれまで得たデータを html.index に挿入し、さらにボタンを作成することで WebVR を開発した。これによりモダリティの変更や、3D オブジェクト・二次元散乱線分布図を表示・非表示さ

せることが可能になった。また本研究で WebVR を操作するために使用した機器は、Windows10 (11th Gen intel(R) Core(TM)i7-11800H @2.30GHz) の PC である。

B-5. 放射線防護教材の作成

開発した WebVR を基に、放射線防護教材を作成した。教材の内容は、放射線防護における重要なポイントである距離や遮へい、照射野サイズに基づいた観察項目や演習問題である。また対象は X 線透視に携わる医療従事者および診療放射線技師を目指す学生とした。作成した問題は全部で 9 問、演習項目は 4 項目として、演習項目①散乱線の広がり方の理解に関する問題が 3 問、演習項目②線源からの距離による線量の違いの理解に関する問題が 2 問、演習項目③防護具の有無による線量の違いの理解に関する問題が 2 問、最後に演習項目④有効な放射線防護法の考察に関する問題が 2 問という構成にした。

(倫理面への配慮)

本研究では、ヒトに関するデータを使用することではなく、倫理面への配慮に関する項目はない。

C. 結果

C-1. 角度毎の防護具がある場合とない場合の線量分布に関する WebVR

Fig. 1 に C アームの角度が LAO 60° の場合の画面を示す。最初は何も表示されず、②のシステム表示ボタンを押すことでボタンに示された 3D オブジェクトの表示と非表示の切り替えを行う。角度が表示されたボタンではその角度の血管造影検査装置、「術者」と表示されたボタンでは術者、「防護板」と表示されたボタンでは防護板が表示される。③の 3D 線量表示ボタンでは、ボタンに示された線量の散乱線分布の三次元的に表示される。ここで、表示している散乱線の単位 [$\mu\text{Sv}/\text{mGy}$] は、周辺線量当量 ($H^*(10)$ [μSv]) を、1 検査当たりの入射表面線量 [mGy] で除したものである。また、①のオーディオメニュー内から任意の角度を選ぶことで角度の変更を行うことができる。WebVR の表示物は、PC のマウスの左クリックで回転、右クリックで移動、ホイールで拡大縮小が可能である。

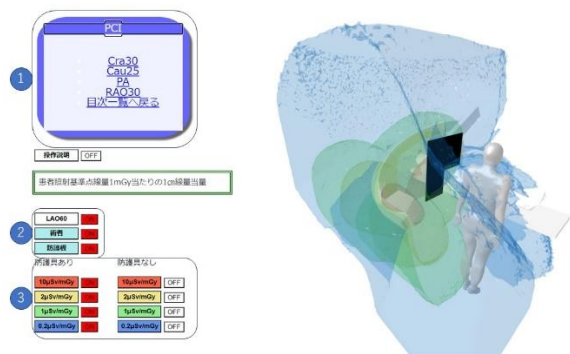


Fig. 1: 角度毎の防護具がある場合とない場合の線量分布に関する WebVR の表示画面(Cra30°)

C-2. 防護板の移動と術者の被ばく量の変化に関する WebVR

Fig. 2 に実際の画面を示す。最初は血管造影検査装置と患者ファントムと術者、防護板が表示されている。患者の胸元からランダムな方向に直方体が発射されている。これは、散乱線は X 線が患者の体に当たって広がること様子を表している。④には、それぞれ散乱線を模した直方体が 10 秒

間に防護板と患者の胸部に当たった数を 10 で除した値を示しており、1 秒間あたりに当たった直方体の数とした。⑤のボタンでは、10 $\mu\text{Sv}/\text{mGy}$ の散乱線分布、術者、患者胸部の直方体が出ている地点を示す球の表示と非表示を切り替えることが可能である。⑥の防護板について、画面をダブルクリックすると、防護板がカーソルに従って移動するようになり、もう一度ダブルクリックすることで位置を固定することが可能である。防護板は現在の視点に対して垂直に上下左右に移動させることが可能であり、奥行き方向に動かす際には視点の移動が必要である。

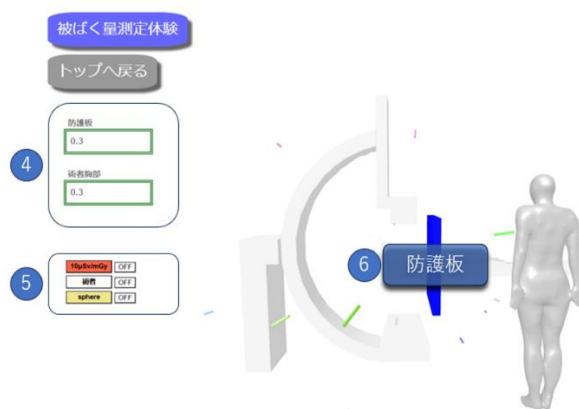


Fig. 2: 防護板の移動と術者の被ばく量の変化に関する WebVR の表示画面

C-3. 血管造影検査中の X 線曝射時の 3D アニメーション

Fig. 3 に実際の画面を示す。最初は血管造影検査装置と患者ファントム、術者が表示されている。⑦の Play ボタンを押すことで X 線が曝射された場合のアニメーションがループ再生される。ループ再生が始まった後にもう一度押すことで最初からループ再生される。⑧の Pause ボタンでは、一時停止の切り替えを行うことが可能である。

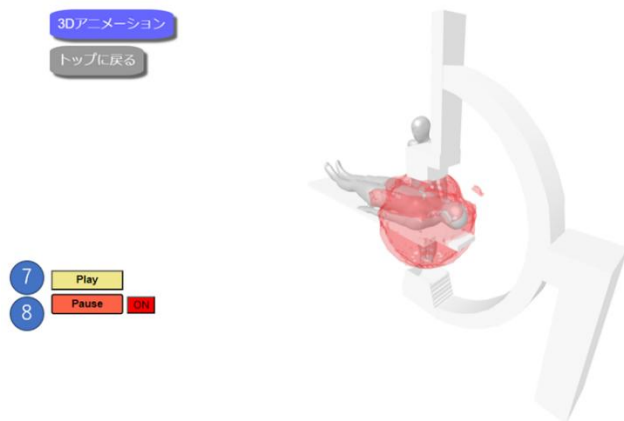


Fig. 3 : 血管造影検査中の X 線曝射時の 3D アニメーションに関する WebVR の表示画面

C-4. 放射線防護教材の作成

操作方法スライドについては Fig. 4 から Fig. 6 に示す。

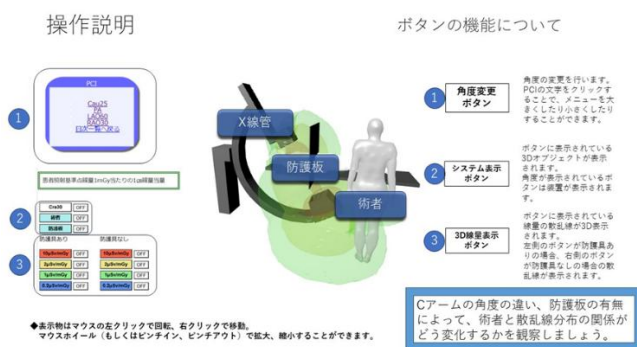


Fig. 4: 角度毎の防護具がある場合とない場合の線量分布に関する WebVR の操作説明

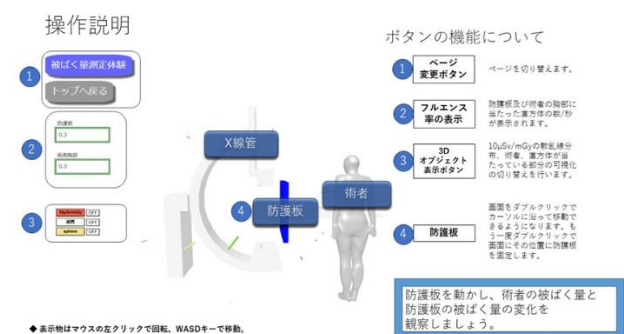


Fig. 5: 防護板の移動と術者の被ばく量の変化に関する WebVR の操作説明

操作説明



Fig. 6 : 血管造影検査中の X 線曝射時の 3D アニメーションに関する WebVR の操作説明

作成した問題は下記の通りである。

1. 角度毎の防護具がある場合とない場合の線量分布に関する問題
防護板の後方の線量が減少し、散乱線の広がりも変化している(答えは○)
Cアームを術者側に傾けると、術者の被ばく量は少なくなる(答えは×)
2. 防護板の移動と術者の被ばく量の変化に関する問題
防護板と X 線管の距離が近いほど、術者の被ばく量は多くなる(答えは○)
X 線管と術者の間に防護板がない場合、術者の胸部に当たる線量は少なくなる(答えは×)
防護板は X 線管と術者の間に置くべきである(答えは○)
3. 血管造影検査中の X 線曝射時の 3D アニメーションに関する問題
散乱線は患者に当たって球状に広がる(答えは○)
術者の足元に当たる線量は少ない(答えは×)

確認テストは、選択肢を選び、正解もしくは不正解が表示された後、1 秒後に次の問題に切り替わる。すべての問題の解答が終わったあとに正答数が表示される。

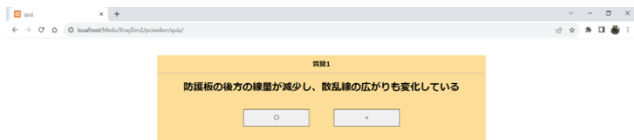


Fig. 7 : 確認テストの画面

C-5. WebVR の機能

Fig. 2 に防護カーテン無しの場合の WebVR の画面を示す。最初に表示されるのは、X 線管、患者、寝台である。各々のボタンの機能は、まず②の 3D オブジェクト表示ボタンを押すと、ボタンに示された線量値の散乱線が三次元的に表示さ

れる。ここで、表示している散乱線の単位 [$\mu\text{Sv}/\text{mGy}$] は、周辺線量当量 ($H^*(10)$ [μSv])を、1 検査当たりの入射表面線量 [mGy]で除したものである。③の Axial、Coronal、Sagittal ボタンを押すと、散乱線分布の二次元断面が表示される。④の 2D animation ボタンを押すと、各断面における散乱線が広がっていく時間変化をアニメーションで表示する。⑤の exposure dose ボタンを押すと、術者の水晶体の高さ (160 cm)、甲状腺の高さ (145 cm)、胸部の高さ (120 cm) における線量が表示される。⑤の distance ボタンを押すと、水晶体の高さ (160 cm) と体幹部の高さ (100 cm) それぞれにおける照射野中心からの距離 50 cm、100 cm、150 cm での線量値が表示される。モダリティの切替えは、①のボタンで行うことができる。WebVR の表示物は、PC のマウスの左クリックで回転、右クリックで移動、ホイールで拡大縮小が可能である。

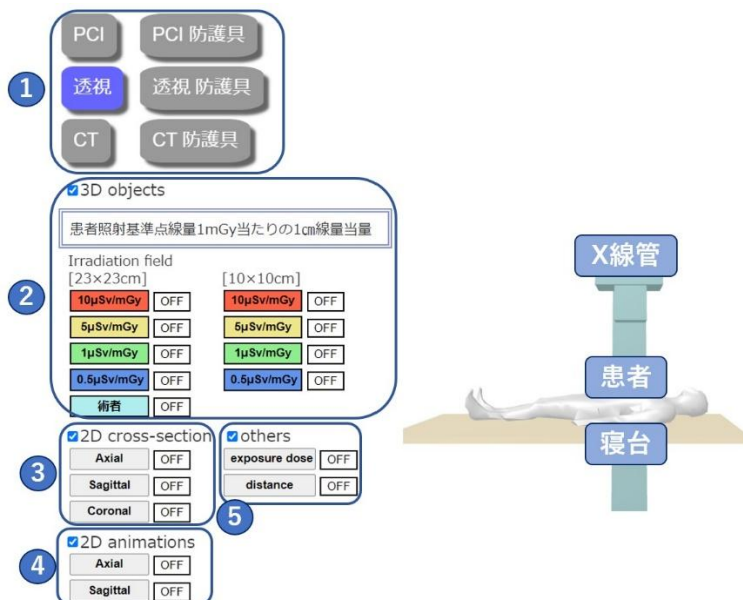


Fig. 2 : WebVR の表示画面 (防護カーテン無し)

- ① モダリティ変更ボタン、②3D オブジェクト表示ボタン、③二次元断面分布図ボタン、
④二次元断面分布図アニメーションボタン、⑤exposure dose ボタン、distance ボタン

ボタンを押して各項目を表示すると、Fig. 3 から

Fig. 5 のようになる。

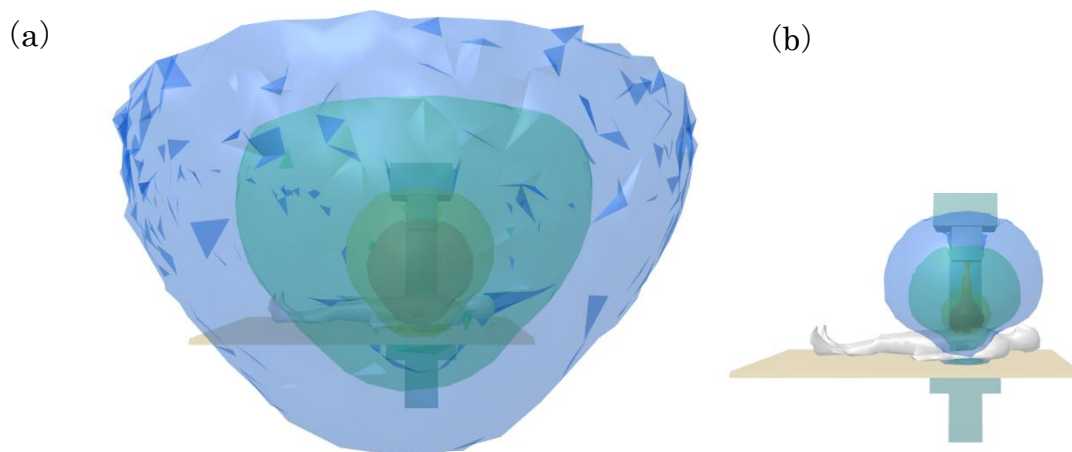


Fig. 3 : 照射野の大きさによる散乱線分布の違い (a) 照射野 23 cm×23 cm (b) 照射野 10 cm×10 cm)

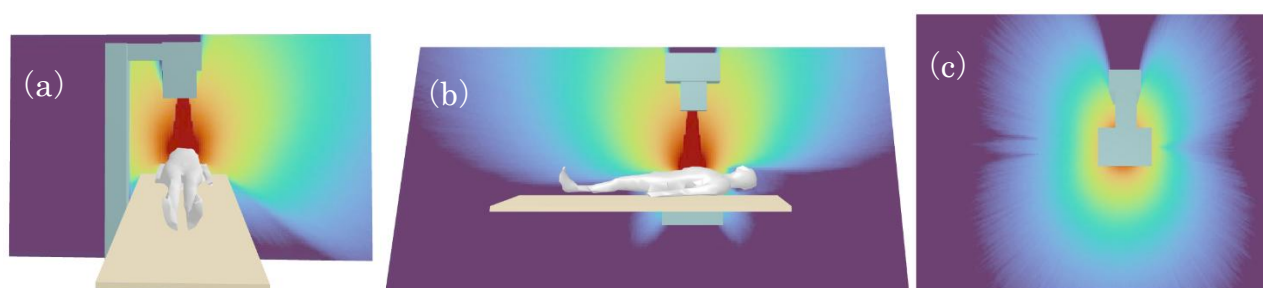


Fig. 4 : 二次元散乱線分布図 (a) Axial 画像 (b) Sagittal 画像 (c) Coronal 画像

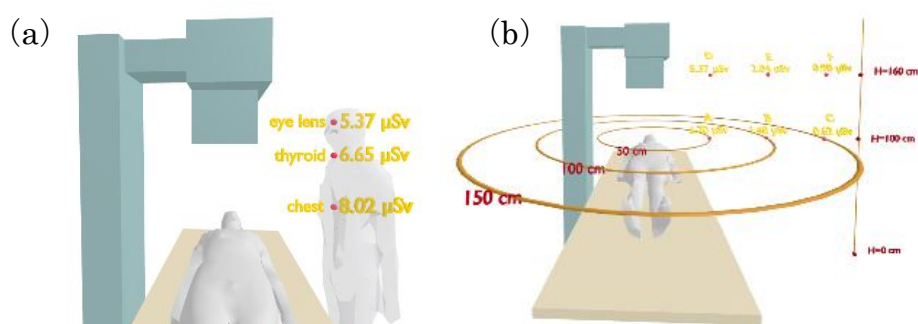


Fig. 5 : 特定の点での線量値 (a) 術者の被ばく線量 (b) 距離ごとの線量

次に防護カーテン有りの場合の WebVR の画面を Fig. 6 から Fig. 8 に示す。防護カーテン有りの場合はカーテンの表示を切り替えることができる (Fig. 6 (a)、(b))。その他のボタンは防護カーテン無しの場合と同様である。防護カーテン

無しの場合の 3D オブジェクトや二次元線量分布図、線量値と比較することで、防護カーテンを付けることにより線量分布に変化があることが視覚的に確認できる。

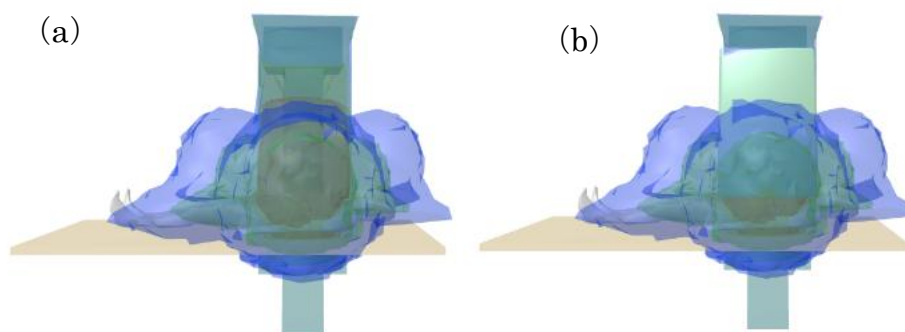


Fig. 6 : 防護カーテンの表示切替 (a) カーテン非表示 (b) カーテン表示

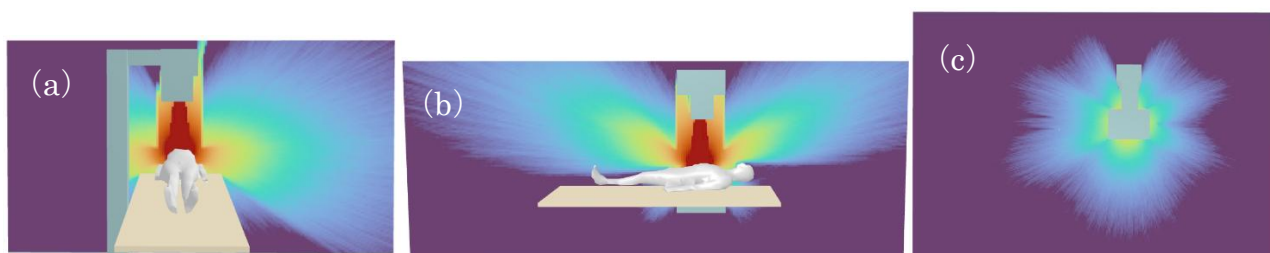


Fig. 7 : 二次元散乱線分布図 (a) Axial 画像 (b) Sagittal 画像 (c) Coronal 画像

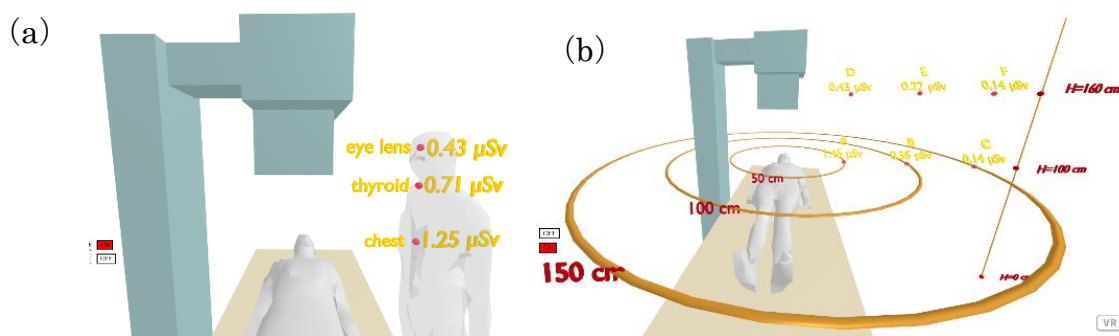
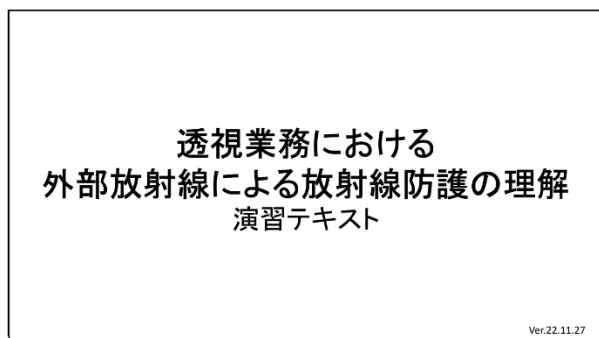


Fig. 8 : 特定の点での線量値 (a) 術者の被ばく線量 (b) 距離ごとの線量

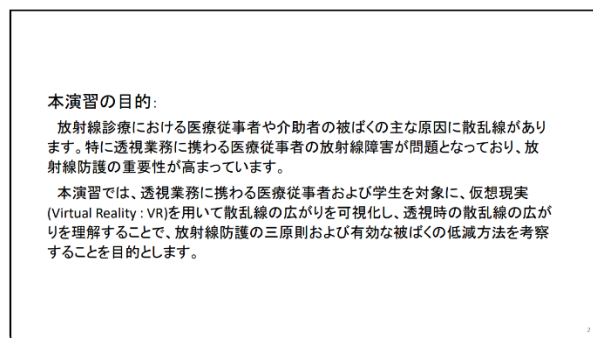
C-6. 放射線防護教材

作成した放射線防護教材の内容を Fig. 9 に示す。また、実際に問題を解いている様子を Fig. 10 に示す。WebVR を操作するための PC と教材

を表示するためのタブレットを使用し、VR を操作しながら教材の問題を解く。



1



2

表示物について

1

PCI 50線量

PCI 50線量

PCI 50線量

2

3D objects

3D objects

3D objects

3

2D cross-section

2D cross-section

2D cross-section

4

2D animation

2D animation

2D animation

ボタンの機能について

(ON, OFFを押すことで切り替えます。)

1

モダリティ変更ボタン

モダリティを切り替えることができます。この画面では「透視」と「透視カーテン有り」のボタンを使用します。

2

3D線量表示ボタン

ボタンに表示されている線量の散乱線が3D表示されます。

3

2D断面分布図表示ボタン

各断面における散乱線分布図が表示されます。

4

2D断面分布アニメーション表示ボタン

照射して散乱線が広がる二次元断面の様子が動画表示されます。

5

exposure dose表示ボタン

術者の被ばく線量が部位ごとに表示されます。

6

distance表示ボタン

床から100cm、150cmの高さそれぞれにおける照射野中心から50cm、100cm、150cmの点での線量が表示されます。

3

散乱線の広がり方を理解する

演習目的:
散乱線がどこから発生してどのように広がるのか、照射野の大きさが散乱線の広がり方にどのような影響を与えるかを理解する。

左上のモダリティ変更ボタンから「透視」を選択してください。

観察項目:
□3D線量表示を変えると、散乱線の広がり方はどう変わるかを確認する。
□2D断面分布のアニメーションで散乱線の時間変化を確認する。
□照射野の大きさにより散乱線の広がり方はどう変わるかを確認する。

問1: 散乱線の広がり方に関して正しいものを選び。
1: 散乱線は患者の入射点(面)を中心に球状に広がっている。
2: 散乱線は患者の入射点(面)を中心に四角錐状に広がっている。
3: 散乱線はX線管を中心に球状に広がっている。
4: 散乱線はX線管を中心に四角錐上に広がっている。

5

線源からの距離による線量の違いを理解する

観察目的:
照射野中心からの距離による被ばく線量の違いを理解する。
床から160cmは水晶体の高さ、床から100cmは体幹部の高さを想定しています。

観察項目:
□distanceボタンを押して各点での線量値を確認する。
(othersからdistanceをONにしてください。)
□照射野中心から距離が離れるにつれて線量はどのように変化しているかを確認する。

7

防護具の有無による線量の違いを理解する

観察目的:
防護具の有無による散乱線分布や被ばく線量の違いから、放射線防護具の重要性を理解する。
有効な防護具の使用法について検討する。

この演習では、防護具として鉛当量0.013 mmPbの防護カーテンを用いた場合を示しています。
左上のモダリティ変更ボタンから「透視 防護具」を選択してください。
(最初は防護カーテンが非表示になっています。表示する場合は3D objectsからcurtainをONにしてください。)

観察項目:
□distanceボタンを押して各点での線量値を確認する。
□3Dオブジェクトやdistanceの線量値から、散乱線の広がり方はどのように変化したかを確認する。
□exposure doseを押して術者の被ばく線量を比較し、どのように変化したかを確認する。
(othersからexposure doseをONにしてください。)

9

断面、照射野、表示線量について

- 資料で示す水平断面、矢状断面、冠状断面は左に示す赤色の枠で定義しています。
- 透視(防護カーテン無し)の3Dオブジェクトのみ、照射野が23cm×23cmと10cm×10cmの場合があります。その他の線量分布図や被ばく線量は照射野が23cm×23cmの場合を示しています。比較する場合は23cm×23cmを使用してください。
- 表示している散乱線の単位は周辺線量当量(H*10) [μSv]を、1検査当たりの入射表面線量[mGy]で除したものです。

1

Axial(水平断面)

→X線管中心での断面

2

Sagittal(矢状断面)

→X線管中心での断面

3

Coronal(冠状断面)

→患者表面での断面

4

問2: 術者の腹部に対してどの方向から散乱線が入射すると考えられるか選べ。
(3D objectsから術者をONにしてください。)

1: ①
2: ②
3: ③

問3: 照射野を23×23cm²から10×10cm²に変更したときの散乱線の広がり方について正しいものを選び。
1: 変更前と散乱線の広がり方は同じである。
2: 変更前より散乱線の広がり方が小さくなる。
3: 変更前より散乱線の広がり方が大きくなる。

6

防護カーテン無し		照射野中心からの距離		
		50 cm	100 cm	150 cm
床からの高さ	160 cm	D: () μSv	E: () μSv	F: () μSv
	100 cm	A: () μSv	B: () μSv	C: () μSv

問4: 照射野中心からの距離とその地点での線量値の関係として正しいものを選び。
1: 距離におおよそ比例して線量が大きくなる。
2: 距離の2乗におおよそ比例して線量が大きくなる。
3: 距離におおよそ反比例して線量が小さくなる。
4: 距離の2乗におおよそ反比例して線量が小さくなる。

問5: 床から100cmの高さ、照射野中心から200 cmの地点での線量値に最も近いと考えられるものを選び。
1: 0 μSv
2: 0.2 μSv
3: 0.4 μSv
4: 0.6 μSv

8

防護カーテン有り		照射野中心からの距離		
		50 cm	100 cm	150 cm
床からの高さ	160 cm	D: () μSv	E: () μSv	F: () μSv
	100 cm	A: () μSv	B: () μSv	C: () μSv

問6: 放射線防護カーテンを用いた際の散乱線の広がり方に関して正しいものを選び。
1: 使用した防護カーテンでは遮蔽効果は見られない。
2: 防護カーテンの後方の線量は減少しているが、散乱線の広がり方は変わらない。
3: 散乱線の広がり方は変わるが、線量値に変化はない。
4: 防護カーテンの後方の線量が減少し、散乱線の広がり方も変化する。

10

134

		被ばく線量			減少率
		防護カーテン無し	防護カーテン有り		
被ばく部位	水晶体	() μSv	() μSv	() %	
	甲状腺	() μSv	() μSv	() %	
	胸部	() μSv	() μSv	() %	

(減少率) =
 (防護具無しの線量) - (防護具有りの線量)
 (防護具無しの線量)

問7: 防護カーテンを付けた際、減少率が最も低かった部位は（水晶体・甲状腺・胸部）である。

その部位での被ばくをより低減する方法として、最も効果的なものを選べ。

- 1: 鉛当量0.010 mmPbの防護カーテンに変更する。
- 2: 患者表面と防護カーテン下端の距離を近づける。
- 3: 患者表面と防護カーテン下端の距離を遠ざける。
- 4: 患者に近づく。

総合問題

問8：外部放射線防護の三原則を全て書け。

() () ()

問9：これまでの演習問題で学んだことや外部放射線防護の三原則を参考に、
放射線診療に携わる際に放射線防護において重要だと考えられることを答えよ。

問題は以上です。

Fig. 9 : 放射線防護教材の内容

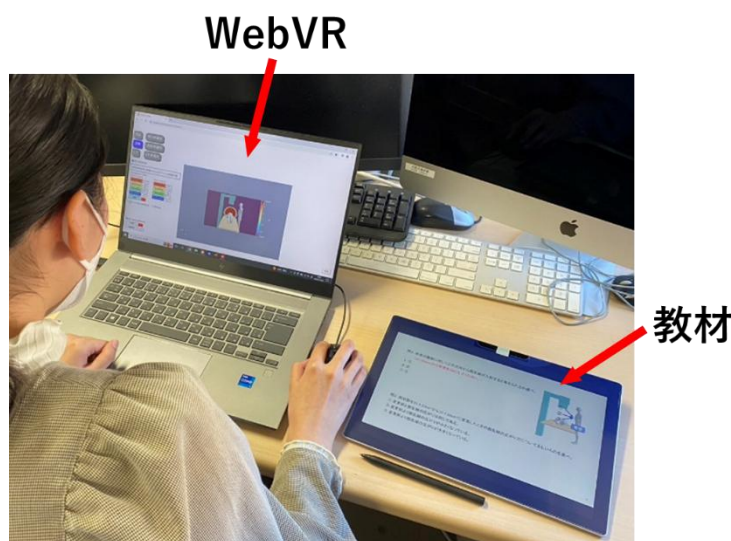


Fig. 10 : WebVR の操作と放射線防護教材を解いているときの様子

実際に同研究室に所属する学生 4 名に WebVR を操作しながら教材を解いてもらったところ、散乱線の広がりが見覚的に分かりやすい、WebVR を操作しながら問題を解くことで散乱線の理解がしやすいといった有効な点と防護カーテン無しと有りの場合の比較がしにくいという課題の意見が得られた。

D. 考察

WebVR の有用性として、条件の違いによる散乱線の広がりの変化を視覚的に理解しやすい点、任意の視点から散乱線の広がりを観察できる点、PC がありインターネット環境が整っていれば利用できる点が挙げられる。

本研究で作成した WebVR の課題点として、術者の視線に立つことができず実際の医療現場との比較が難しい点、広範囲の線量分布などの

データ容量が大きいオブジェクトでは動作に支障が出る可能性がある点、防護板の移動と術者の被ばく量の変化に関する WebVR では数値のブレがある点、本研究で作成した WebVR では一部の機能が PC 以外では使用できない点が挙げられる。

実際の医療現場との比較について、術者と同じ目線に立つことで、術者の部位別の被ばく量が視覚的に理解しやすいと考える。しかし、本研究で作成した WebVR では、術者と同じ目線に立つことができず、第三者視点での観察しかできない。学習中にカメラを移動させて術者と同じ目線に立つことも可能であるが、調整が難しく、学習者によって視点の位置のズレが起こればと考える。これは、AR (Augmented Reality : 拡張現実) 技術の併用や、ヘッドマウントディスプレイを用いた VR 技術などで、術者の目線に立ったり、実際に手術室内を動いたりすること

で解消できると考えられる。

WebVR の読み込み速度について、用いるデバイスのスペックによって異なると考えられる。本研究において用いた PC では遅延が発生することはなく、スペックの低い PC での動作については別途の検証が必要であると考ええる。防護板の移動と術者の被ばく量の変化に関する WebVR では数値のブレについて、移動した直後に数値にブレがある場合と防護板が X 線管と術者の間にないときに術者の胸部の数値が防護板の数値よりも低くなる場合がある。移動した直後の数値のブレは 20 秒から 30 秒ほど放置すれば安定するが、学習者にとって理解の妨げになる恐れがあると考ええる。防護板が術者から離れている際に術者の数値が低くなる場合について、防護板を移動する際に防護板の中心にカーソルを合わせなければならず、移動しやすくするためある程度の厚みを持たせてあるため、直方が当たってカウントされてしまい、数値のブレが起こると考える。また、散乱線に模した直方は乱数を生成する関数により、四方に発生しているが、防護板と術者の胸部に向かう直方にムラがある場合があり、数値のブレになっていると考える。プログラムの改善が必要である。また、防護板移動は PC 以外では利用できないため、プログラムの改善が必要であると考ええる。

放射線防護教材としての課題点として、具体的な指示を行わないため、学習目標が何を目的に観察をするべきかが不明瞭であると考ええる。操作説明スライドを増やすなどが必要であると考ええる。また、放射線防護教材としての有用性の検証が必要である。

WebVR の有用性として、以下のことが挙げられる。まず条件の違いによる散乱線の広がりの変化を視覚的に理解しやすいこと、任意の視点から散乱線の広がりを見ることができ、ヘッドマウントディスプレイのような専用機器を必要とせず、PC やタブレットがあれば誰でも利用することができること⁴⁾、教材と併用することで、防護対策におけるポイントの理解促進に繋げられることである。

一方 WebVR の課題点として、実際の医療現場との比較がしにくいこと、防護カーテン無しと有りの場合ではページが変わり、比較がしに

くいこと、広範囲の散乱線分布ではデータ容量が大きくなり、動作環境に支障が出ることが挙げられる。実際の医療現場との比較に関しては、現実世界と仮想物体を融合できる AR (Augmented Reality: 拡張現実) 技術を用いることで解消できると考えられる。また従事者であれば自分の職場の機器として想像できるのではないかという意見が得られたため、従事者からの意見を十分に集め、検討する必要がある。防護カーテンの有無による比較に関しては、別のウィンドウで開くか、重ねて表示できるようにプログラムを変更する必要がある。WebVR の読み込み速度は、用いる PC のスペックにより異なると考えられる³⁾。今回用いた PC では遅延が発生することはなかったため、どの程度のスペックにより影響が出るのかを検討し、またできる限りデータ容量を低減させておく必要があると考えられる。また、防護カーテンの厚さによる散乱線の広がりへの影響に関する項目の検討ができていないため、計算を行い、さらなる機能拡充を行う必要がある。

また放射線防護教材の課題として、VR を操作する機器とは別に教材を表示するための端末もしくは印刷した紙面が必要となること、実際に X 線透視で働かれている医療従事者および学生にこの教材を試してもらうことができておらず、放射線防護の教育にどのくらい有用であるかを検討する必要があることが挙げられる。

E. 結論

WebVR を用いて血管造影検査時の散乱線の広がりを見視化し、その VR を基にした放射線防護教材を開発した。WebVR は、条件の違いによる散乱線の広がりの変化が分かりやすく、任意の視点から観察でき、インターネット環境を整えれば利用が可能である。しかし、データ容量による動作環境の制限などの課題点も存在する。今後、課題点を改善した上で放射線防護教材としての有用性を検討する必要がある。

また WebVR を用いて X 線透視検査時の散乱線の広がりを見視化し、その VR を基にした放射線防護教材を開発した。WebVR はヘッドマウントディスプレイのような専用機器を必要とせず、ネットワーク環境があれば誰でも使用でき

るという利点がある。しかしデータ容量による動作環境の制限や防護カーテンの厚さによる散乱線の広がりへの影響の考察といった課題がある。そのため今後課題を解決した上で、さらに X 線透視に携わる医療従事者の観点から放射線防護教材の有用性について検討する必要がある。

F. 健康危険情報

なし

G. 研究発表

1. 論文発表

なし

2. 学会発表

なし

H. 知的財産権の出願・登録状況

(予定を含む。)

1. 特許取得

なし

2. 実用新案登録

なし

3. その他

なし

労災疾病臨床研究事業費補助金
総合（令和4年度～令和6年度）分担研究報告書
デジタルトランスフォーメーションを活用した医療従事者の被ばく低減プログラム
の開発と有効性の検証（220201）

Ray tracing を利用したリアルタイム散乱放射線分布計算

研究分担者 藤淵 俊王 九州大学大学院医学研究院保健学部門医用量子線科学分野 教授

研究要旨

本研究では、Ray tracing 技術を用いて透視時の散乱放射線分布をリアルタイムに計算するアプリケーションを開発した。X線透視において、室内の散乱放射線の多くは患者から発生し、患者から発生した散乱放射線は直線的に進行すると仮定した。仮想X線透視室において、患者の体表面から体外に広がる散乱放射線の方向ベクトル、エネルギー情報をシミュレーションにより取得した。この情報を基にX線診療室内の散乱放射線量分布を計算した。モンテカルロシミュレーションに対する本手法で散乱放射線量の算出値の比は、X線装置の裏側などを除き、ほとんどが0.7から1.8倍の範囲内だった。防護板を移動に伴い、散乱放射線分布もスムーズに変化した。配置の自由度の高い防護板の使用において、都度散乱放射線分布を測定することは現実的でなく、簡易的に散乱放射線分布やスタッフの線量の変化を確認することで、防護板の適切な配置方法の直感的な理解につながった。

研究協力者

田淵 麻央

九州大学大学院医学系学府保健学専攻医用量子線科学分野

A. 研究目的

X線診療は現在の医療において欠かせないものになっている。X線透視下手技(FGI)は、X線透視をしながらカテーテルの留置や治療を行う手法である。ERCPやPTCD等様々な症例においてX線透視ガイド下手技が実施可能となりX線透視装置の臨床上の有用性が向上している。FGIでは患者を開腹しなくてよいことから侵襲度が低いという利点がある。

その一方、手技をする医師や看護師などの医療スタッフの職業被ばくが多くなることが問題となり、適切な被ばく低減対策が求められる[1-5]。FGI時の主な散乱放射線源は患者である。特にERCPでは術者の水晶体の被ばくが多いことが問題となっている。外部放射線防護の3原則として距離、時間、遮蔽がある。距離に関しては手技をする上で術者は主な散乱放射線源である患者に近づかざるを得ない。そのため、遮蔽による放射線防護が有効である。

体幹部の遮蔽として、放射線防護衣が使用され

ている。また眼の水晶体の放射線防護には放射線防護眼鏡が使用されている[6]。これらの放射線防護具で遮蔽が不十分な場合に、放射線防護板が有効である。放射線防護板は自由に配置することが出来るが、自由度が高いことから適切な配置方法の直感的な理解やその効果を把握することが難しい。

X線照射時の散乱放射線分布を検証する方法として、モンテカルロシミュレーションを利用した可視化技術がある[7-11]。正確に場の散乱放射線量分布をシミュレーションすることが出来るが、通常のPCを使用した場合、計算時間がかかるという問題がある。近年、3DCGを利用したゲームや映画等の映像表現において、光の挙動や散乱を正確に再現してリアリティをだすために、Ray tracing という手法が使用されている[12]。我々は、ray tracing 技術を利用して、主な散乱放射線源である患者を光源、散乱放射線を光と見立て、X線診療室内の散乱放射線分

布を簡易的かつ高速にシミュレーションすることが出来ないかと考えた。

そこで本研究では、Ray tracing 技術を用いて患者への X 線照射時に医療スタッフの位置に応じて室内の散乱放射線分布の変化をリアルタイムに計算するアプリケーションを開発することを目的とする。

B 方法

B.1 X 線検査室の再現と散乱放射線分布情報の算出

散乱放射線分布を X 線診療室の構造は、先行研究で作成したものを使用した[13]。30 cm×30 cm×15 cm の実在する水ファントムに X 線を照射した際のファントム周囲の散乱放射線の周辺線量当量をサーベイメータによる測定とシミュレーションにより比較した。その結果、この室内の測定値とシミュレーション値の差は±10%以内であることを確認した。

シミュレーションの精度を確認した上で、患者のモデルとして ICRP 110 男性ボクセルファントムを使用した[16]。ファントムは仰臥位とし、上腹部に照射した。ファントムから室内の空气中に放出される光子の散乱放射線方向ベクトル、エネルギー情報を 16000 本、csv 形式で保存した。

B.2 Building a real-time calculation model

Ray tracing を利用したアプリケーションの開発について、Unity(2020.3.20f1)を利用した。並列計算の効率化のために、Unity DOTS(Data-Oriented Technology Stack)を利用したプログラムを含めた。X 線撮影において、室内の散乱放射線の多くは患者から発生し、患者から発生した散乱放射線は室内の空気中で散乱することなく直線的に進行するという仮定とした。仮想 X 線室において、仰臥位での透視における患者の体表面から体外に広がる散乱放射線方向ベクトル、エネルギー情報を取り込んだ。この情報を基に Fig 1 に示す 50 cm 間隔の評価点を設置し、この点を通過する光子数から X 線診療室内の散乱放射線量分布を計算した。ここで仮想 X 線診療室の座標は、X 線照射野中心で撮影寝台を原点とし、+X 方向を患者頭側方向、-X 方向を患者足側方向、+Y 軸を天井方向、-Y 軸を床方向、+Z 軸を患者右方向、-Z 軸を患者左方向と定義した。

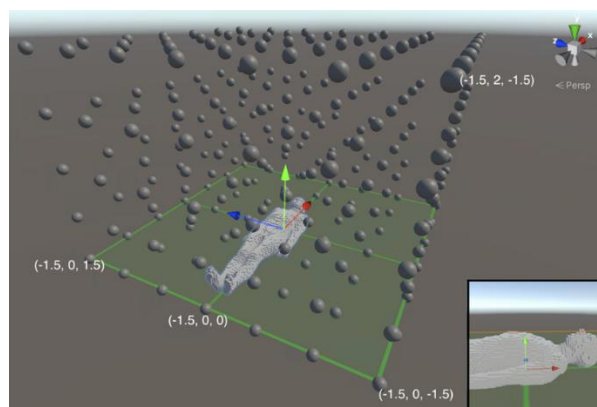


Figure 1 仮想 X 線診療室内の散乱放射線量評価点

散乱線量分布は相対値であり、アプリケーション上で換算係数を入力すること全体の値を変更できるようにした。

仮想 X 線診療室内には 3 人の医療スタッフと放射線防護板を配置した。医療スタッフを室内に配置し散乱放射線と衝突した際、散乱放射線の進行方向と防護板の位置に応じて室内の散乱放射線分布が瞬時に変化するようにした。X 線診療室には複数の線量評価点を含む医療スタッフ 3D モデルを配置し、マウス操作で室内を移動できるようにした。また医療スタッフモデルの両眼、甲状腺、胸部中心、腹部中心、腰部中心、右指先、左指先に評価点を置くことで、その位置における各評価点を算出できるようにした。

B.3 Ray tracing 計算と Monte Carlo 計算の比較

シミュレーション精度を検証するため、X 線撮影において医療従事者が手技のために配置される患者左側 X 軸を -1.5, -0.5, 0.5, 1.5 m、Z 軸を -0.5, 0.5, 1.5 m とし、床から 1, 1.5 および 2 m の高さ計 36 点でモンテカルロシミュレーションと本シミュレーションによる比較をした。

C. 結果

C.1. 患者からの散乱放射線方向ベクトル

モンテカルロシミュレーションで取得した患者からの散乱放射線方向ベクトル情報を Fig. 2 に示す。取得した散乱放射線方向ベクトル情報は、16,000 である。

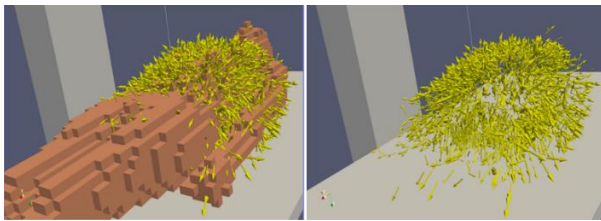


Fig. 2 散乱放射線の方角ベクトル情報の可視化

C.2 Ray tracing 計算と Monte Carlo 計算の比較

Monte Carlo 計算に対する Ray tracing 計算の比を Figure 3 に示す。X 線装置の裏側などを除き、床から 1 m の高さで、評価点においては 0.8 から 1.8 の間に収まった。それ以外の高さにおいて 0.7 から 1.4 倍の範囲内だった。1 m の高さで Ray tracing による計算結果が比較的高くなった。

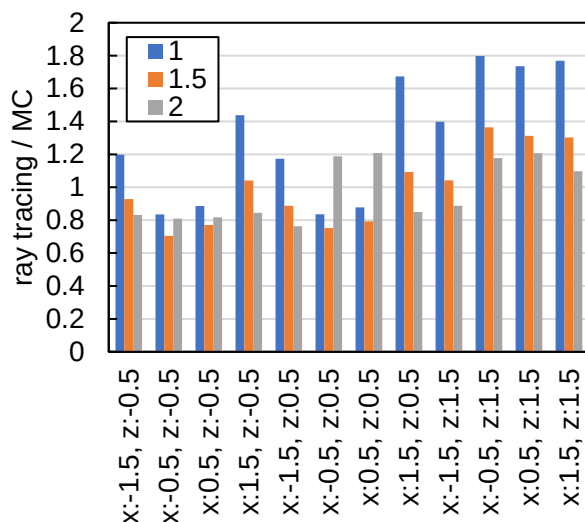


Fig. 3 Monte Carlo 計算に対する Ray tracing 計算の比。横軸は x, z 軸の座標を示す。縦軸は MC による線量に対する Ray tracing 計算線量の比である。

Figure 4 にアプリケーションの外観を示す。アプリケーションは 4 つの画面で校正されている。左側の画面は仮想 X 線診療室をマウス操作により任意の方向から表示できる。医療スタッフは、下のスライダーにより移動する。画面上部で、各評価点の線量を表示できる。散乱放射線量分布のカラーマップは、下限値と上限値を数値入力できる。さらに、リニアスケールとロ

グスケールでカラーの変化を切り替えできる。室内全体の拡大と縮小表示と平行移動がマウス操作により可能である。

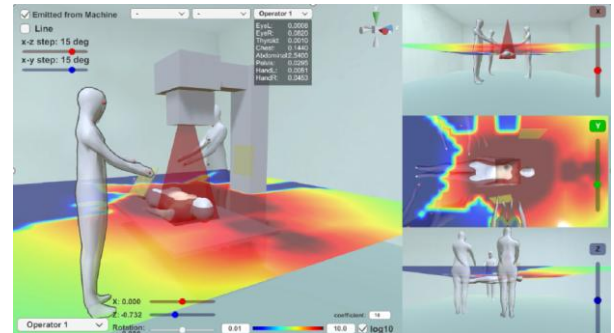


Fig. 4 Ray tracing 散乱放射線分布表示アプリケーションの外観

Figure 5 に、医療スタッフの位置を変更した際の散乱放射線分布のシミュレーション結果を示す。医療スタッフの後方で散乱放射線が低下していることが確認できる。散乱放射線ベクトルは患者から同心円状に広がっており、散乱放射線の減少部分が医療スタッフ後方の斜め上方向に向かって広がっている。また X 線装置の後方も、装置による遮蔽により散乱放射線量が減弱していることが確認できる。医療スタッフの移動に伴う散乱放射線分布の変化は 1 秒以内にできた。

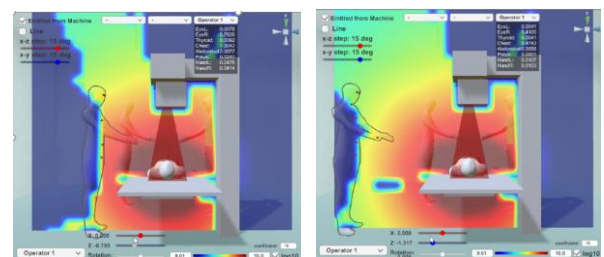


Figure 5. 患者横断面における本システムにより計算した散乱放射線分布。左は患者中心から左側に 80 cm の位置、右は 160cm の位置に医療スタッフを配置した。医療スタッフの後方で線量が低減している。

画面の右側は、患者の頭足方向、天井床方向、患者の左右方向で散乱放射線の断面を表示している。右側のスライダーで断面の位置をスライドできる。同時に 1 断面のみである。放射線防護板を左上では床から 150 cm、右上では 80 cm、下は 100 cm に配置している。さらに下の図では防護板を床に対して左側は垂直に、右側

は 30 度傾けて配置した。放射線防護板の配置に位置より、散乱放射線量の減少する範囲が異なることが確認できた。

Figure 6 に放射線防護板の位置による散乱放射線分布の違いを示す。

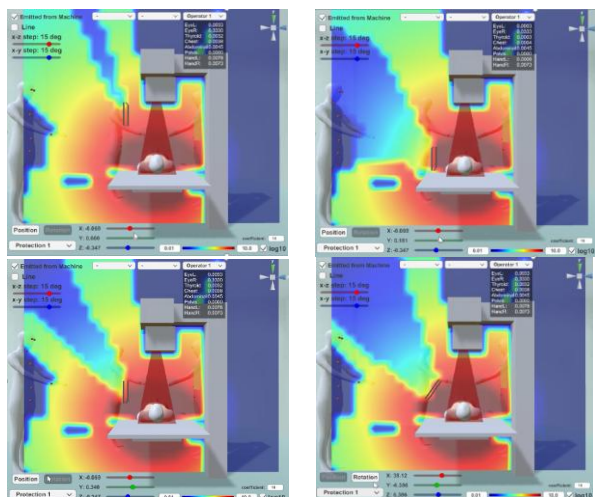


Figure 6. 放射線防護板の位置や傾きによる散乱放射線分布。3 次元散乱放射線計算をしているため、任意の断面を任意の角度から表示できる。

Figure 7 に、患者矢状断面での散乱放射線分布を示す。患者から離れるに従い散乱放射線量が減弱していることが確認できる。

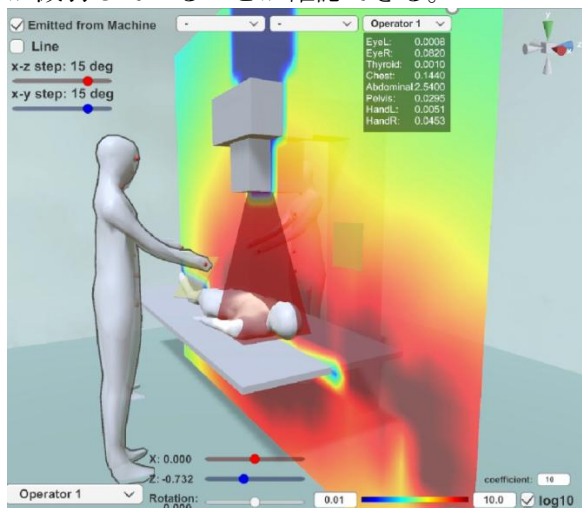


Fig. 7 患者矢状断面における本システムにより計算した散乱放射線分布。3 次元散乱放射線計算をしているため、任意の断面を任意の角度から表示できる。

D. 議論

本研究の主要な点は、ray tracing 技術を使うことで、X 線透視時の散乱放射線分布をリアルタイムにシミュレーションすることである。X 線透視において放射線防護板の有効性が多くの論文等で述べられているが、放射線防護板の配置は自由度が高いことから、適切な使用方法をトレーニングすることは困難である。本研究で開発したアプリケーションは簡易計算であるが、医療スタッフや室内の物体の移動による直感的に散乱放射線分布や線量の変化を表示できる画期的なシステムであり、新規性の高いものと言える。

本システムでは、医療スタッフの移動に伴い、散乱放射線分布もスムーズに変化した。配置の自由度の高い医療スタッフの使用において、都度散乱放射線分布を測定、モンテカルロ計算することは現実的でない。本システムではリアルタイムに医療スタッフの被ばく量と簡易的に散乱放射線分布やスタッフや放射線防護板の位置による線量の変化を確認することが出来る。血管造影において放射線防護板は天井から吊るされていることが多く、配置の自由度が高い。放射線は目に見えないことから医療スタッフにとって散乱放射線の広がり認識することは困難である。本システムは、計算精度は高くないものの、医療スタッフの診療上支障のない安全な位置の確認や放射線防護板の適切な配置方法の直感的な理解につなげることが出来、放射線防護教育に有用である。

一方で、本システムの線量計算精度には複数の限界がある。本計算では散乱放射線が物体に衝突した際の 2 次散乱に対して考慮していない。実際には物体に衝突することでさらに散乱放射線が発生する。散乱放射線源は患者のみの情報を使用している。また減弱の計数は一律の値を使用している。実際には物体により減弱係数が異なることから、正確な計算にはことを考慮させる必要がある。実際には X 線管や寝台などからも散乱放射線が発生するため、より正確には全ての構造体からの散乱放射線源の情報を取得してシステムに取り込む必要がある。

今回は ray tracing による散乱放射線分布のリアルタイムシミュレーションができるかの予備的検討であり、今後の検討として、上記課題

の解決と、様々な照射条件、また他の X 線装置への対応を目指す。

E. 結論

本研究において、ray tracing 技術により X 線診療室内の散乱放射線分布をリアルタイムに計算、表示させるアプリケーションを作成した。このシステムにより診療時の被ばく低減を意識した医療スタッフの位置や適切な放射線防護板の使用方法を理解するために有効な教育ツールになることが示唆された。一方で計算精度は十分でないことから、今後はシミュレーション精度の向上と多くの照射条件、モダリティへの対応を目指す。

F. 健康危険情報

なし

G. 研究発表

1. 論文発表

1. Fujibuchi, T. Study on Radiation Protection Educational Tool Using Real-Time Scattering Radiation Distribution Calculation Method with Ray Tracing Technology, Information, 16, 266, 2025.

2. 学会発表

1. Toshioh Fujibuchi, Hiroyuki Arakawa, Development of real-time scattered radiation distribution display application according to the position of radiation protection plate, The 80th annual meeting of the JSRT, Yokohama, April 11-14, 2024.
2. 田渕 麻央, 檜作 響子, 藤淵 俊王, Ray tracing を利用した X 線透視室内の散乱線分布可視化システムの開発と精度検証. 第 1 回日本放射線医療技術学会(JCRTM 2024), 沖縄, 2024 年 10 月 31 日-11 月 3 日.
3. 田渕 麻央, Lee Hyojin, 藤淵俊王. 診療用 X 線管におけるターゲット内の相互作用を再現した散乱線分布のモンテカルロシミュレーションの検討. 第 19 回九州放射線医療技術学会大会, 宮崎, 2024 年 12 月 21 日-12 月 22 日

H. 知的財産権の出願・登録状況

(予定を含む。)

1. 特許取得

なし

2. 実用新案登録

なし

3. その他

なし

労災疾病臨床研究事業費補助金
総合（令和4年度～令和6年度）分担研究報告書
デジタルトランスフォーメーションを活用した医療従事者の被ばく低減プログラム
の開発と有効性の検証（220201）

X線透視における散乱線方向ベクトルを利用した放射線防護板配置時の簡易線量分布
計算法の検討

研究分担者 藤淵 俊王 九州大学大学院医学研究院保健学部門医用量子線科学分野 教授

研究要旨

X線透視業務に携わる医療従事者の放射線防護対策一つとして放射線防護板の使用がある。これまでの研究では、モンテカルロシミュレーションを用いた放射線防護板を配置した際の線量分布の可視化が行われている。しかし、モンテカルロシミュレーションは計算に時間がかかるという短所がある。そこで、方向ベクトルを利用して、防護板配置時の線量分布を短時間で簡易的に計算できるようにした。

モンテカルロコードである PHITS（ver3.31）を用いて、Cアーム型 X線透視撮影装置による X線透視時の透視室内のフルエンス分布と周辺線量当量分布をシミュレーションした。透視室内のフルエンス分布の計算結果をもとに、室内の空間を 5cm の間隔で平均した光子の方向ベクトルを得た。このとき、ファントムからの散乱、X線管からの散乱、その他に分けて計算した。方向ベクトルを利用して、線源や防護板の位置により、周辺線量当量分布から防護板配置時の周辺線量当量分布を簡易的に計算するプログラムを作成した。このプログラムを使用した簡易的な線量分布を三次元可視化ソフトである ParaView 上で表示した。同様の条件で実測と PHITS シミュレーションを行い、簡易線量分布計算の精度を検証した。

簡易線量分布計算では、防護板による遮蔽が再現できていることが確認できた。簡易線量分布計算とシミュレーションの計算時間を比較した。簡易線量分布計算は平均 13 秒、PHITS シミュレーションは平均 20 時間 39 分 46 秒かかった。簡易線量分布計算は PHITS シミュレーションと比べて非常に計算時間が短くなった。

簡易線量分布計算では、防護板を任意の位置に配置した時の線量分布を短時間で計算し、防護板の位置による線量分布の変化を示すことができた。

研究協力者

檜作 響子

九州大学大学院医学系学府保健学専攻医用量子線科学分野

A. 研究目的

X線透視業務に携わる医療従事者は被ばくが多く、業務量の多い医師や看護師は水晶体の等価線量が線量限度を超える可能性がある。そのため、積極的な放射線防護対策が必要である。散乱線による被ばくの低減するための方法の一つとして放射線防護板の使用がある。防護板は防護したい部位に対して使用者が動かして使用するため、使用者が適切な使用方法を理解しておく必要がある。そのためには、防護板の位置による線量分布の変化を視覚的に理解すること

が有効であると考えられる。

先行研究では、モンテカルロシミュレーションを用いた放射線防護板を配置した際の線量分布の可視化は行われている。しかし、モンテカルロシミュレーションは計算に時間がかかるという短所があり、防護板の位置を動かすたびにモンテカルロシミュレーションを行うとすぐに結果を確認することができない。そこで、モンテカルロシミュレーションを行わずに、防護板を配置した際の線量分布を短時間で簡易的に計

算できるようにした。

本研究では、透視時の散乱線の方向ベクトルを利用して防護板を任意の位置に配置した際の線量分布を短時間で簡易的に計算し、防護板の位置による線量分布の変化を示す手法を検討した。

B 方法

B-1. X線透視室のシミュレーション

本研究では、モンテカルロコードである Particle and Heavy Ion Transport code System (PHITS) を使って X 線透視装置で患者を模したファントムを照射したときの透視室内の散乱線の挙動をシミュレーションした。X 線照射は、X 線透視診断装置 CALNEO CROSS (富士フィルムメディカル株式会社, 東京, 日本) を用いた。シミュレーションの精度は前回の研究で確認した。X 線管はポリカーボネート (密度 1.2 gcm^{-3})、C アームはアルミニウム (密度 2.7 gcm^{-3})、寝台はアクリル樹脂 (密度 1.18 gcm^{-3})、クッションはウレタン (密度 0.02 gcm^{-3}) である。X 線管の内部は鉄 (7.87 gcm^{-3}) で遮蔽し、コリメータは鉛 (密度 11.34 gcm^{-3}) である。放射線源は、診断領域 X 線スペクトル近似計算ソフト X-ray-Spectrum を用いて算出した。条件は、管電圧 66 kV、ターゲット角度 9 度、固有濾過 2.5 mmAl の Tucker による近似式を用いて 0.5 keV ごとの診断 X 線スペクトルとした。線源表面間距離 65 cm、焦点-検出器間距離 106 cm、照射野サイズ $46 \times 46 \text{ cm}^2$ 、透視室内の空間 $315 \times 285 \times 235 \text{ cm}^3$ とした。また、C アームの角度は、AP とした。被写体には、 $30 \times 30 \times 15 \text{ cm}^3$ の水ファントムを用いて、水ファントムの中心を照射野の中心に合わせて照射した。ICRP Publication 74 のフルエンスから周辺線量当量への換算係数を用いて、周辺線量当量を算出した。シミュレーションにおけるヒストリー数は 1×10^8 、光子と電子のカットオフエネルギーは 10 keV とした。

実測は、各測定点で 3 回行い、その平均値を測定値とした。周辺線量当量は、床からの高さ 100 cm のとき、水ファントムの中心から 50 cm、100 cm の距離で、角度 0 度、45 度、90 度の方

向で、計 6 点測定した。測定点は、Figure 1 に示すように、1 から 12 までの番号を割り振った。

PHITS によるシミュレーションでは、実測時と同様の幾何学的配置を再現し、周辺線量当量を計算した。X 線管はポリカーボネート (密度 1.2 gcm^{-3})、C アームはアルミニウム (密度 2.7 gcm^{-3})、寝台はアクリル樹脂 (密度 1.18 gcm^{-3}) である。X 線管の内部は鉄 (7.87 gcm^{-3}) で遮蔽し、コリメータは鉛 (密度 11.34 gcm^{-3}) である。放射線源は、診断領域 X 線スペクトル近似計算ソフト X-ray-Spectrum を用いて算出した。条件は、管電圧 80 kV、ターゲット角度 9 度、固有濾過 2.5 mmAl の Tucker による近似式を用いて 0.5 keV ごとの診断 X 線スペクトルとした。測定点に $10 \times 10 \times 1 \text{ cm}^3$ の直方体を配置し、直方体を通過する光子をカウントして、ICRP 74 のフルエンスから周辺線量当量への換算係数を用いて、周辺線量当量を算出した。シミュレーションにおけるヒストリー数は 5.3×10^9 、光子と電子のカットオフエネルギーは 10 keV とした。

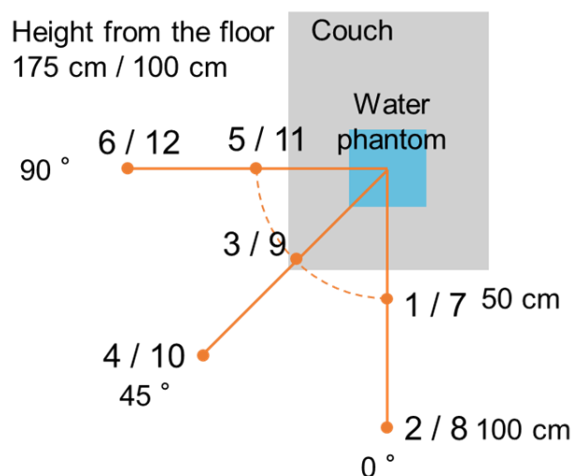


Figure 1 周辺線量当量の測定点の配置

寝台の上に水ファントムを置き、その周囲の 12 点について、周辺線量当量を測定した。周辺線量当量は、床からの高さ 100 cm 及び 170 cm のとき、水ファントムの中心から 50 cm、100 cm

の距離で、角度 0 度、45 度、90 度の方向で、計 12 点測定した。

B-2. 散乱線の方角ベクトルの表示

PHITS を使用して X 線透視装置で照射したときの患者を模したファントムからの散乱線の挙動をシミュレーションした。そして、散乱線の方角ベクトルの表示のため、PHITS にて dump データを取得した。dump データとは、特定領域を通過した粒子の種類、座標、運動量の単位ベクトル、エネルギーなどの粒子の情報をファイルに出力したものである。

PHITS によるシミュレーションの照射条件は、管電圧 66-78 kV、線源表面間距離 55-66 cm、焦点-検出器間距離 106 cm、照射野サイズ 35×43 cm² とした。患者には、ICRP Publ.110 標準男性ボクセルファントム 23)を用いた。また、C アームの角度は、AP、RAO30°、RAO90°、PA、LPO30° とした。

X線を照射した場合、散乱線に比べ直接線の成分はけた違いに多い。X線を照射した際の直接線の成分を除き、患者からの散乱線のみを表示させるために、計算を2段階に分けた。散乱線の方角ベクトルの表示の手順について、まず、1段階目の計算で、X線管の焦点から放出された光子のうちファントムに入射した光子の位置・方向ベクトル・エネルギー情報を出力した。次に、2段階目の計算では、出力データを放射線源として、患者からの散乱線を計算した。このとき、ファントムの中心を原点とした球を設定し、領域から外側に移動する光子の位置・方向ベクトル・エネルギー情報をファイルに出力した。球の半径は 10 cm から 150 cm まで、半径 10 cm ごとに位置・方向ベクトル・エネルギーを取得した。取得したデータは、三次元可視化ソフトウェア ParaView version 5.10.1(Kitware, Inc., New York)に取り込んだ。エネルギーから矢印の大きさを指定して、散乱線の方角ベクトルとした。ParaView では、X 線透視診断装置のアイソセンタを原点とし、寝台短軸方向を X 軸、寝台

長軸方向を Y 軸、X 線照射の方向を Z 軸とした。

B-2-a. 周辺線量当量分布との比較

方向ベクトルは向きを示すが、線量分布は強さや量を示す。そこで、散乱線の方角ベクトルと線量分布の関係を比較するために、PHITS にて散乱線の周辺線量当量の分布をシミュレーションした。放射線源は、II-2 で示した患者を模擬したファントムに入射した光子データを用いて、周辺線量当量を計算した。Y = 0.00 (照射野の中心) の断面、X = 0.00 (照射野の中心) の断面、Z = -21.65 cm (患者中心の高さ) の断面について、周辺線量当量の分布と散乱線の方角ベクトルを重ね合わせて表示した。

B-2-b. C アームの角度での比較

C アーム型 X 線透視は手技により C アームの角度が変わる。そこで、C アームの角度を変えたときの散乱線の方角ベクトルを示すため、Y = 0.00 (照射野の中心) の断面について、周辺線量当量の分布と散乱線の方角ベクトルを重ね合わせて表示した。

B-2-c. 防護板に到達する散乱線の方角ベクトルの評価

PHITS によるシミュレーションにて、防護板を配置したときの散乱線の方角ベクトルと周辺線量当量の分布を計算した。防護板は、移動型防護装置 ML (クラレトレーディング株式会社、大阪、日本)を用いて、鉛当量 0.80 mmPb、サイズ 37×57 cm²、厚さ 2 cm で再現した。防護板の配置について、Figure 2 に示すように、C アームの角度は AP 方向で、床からの高さとして患者からの距離を変えた。防護板が患者から 25 cm の距離のとき、床からの高さ 110 cm、130 cm、150 cm で配置した。そして、散乱線源の近くに立つ術者に対して散乱線がどのような方向から来るのかということを明らかにするために、患者からの距離 35 cm の位置に術者を表示した。

術者はICRP Publ.110 標準男性ボクセルファントムの表面を用いて再現し、ボクセルファントムを術者の目安として、散乱線方向ベクトルに重ね合わせて表示した。また、術者の位置における線量プロファイルを作成し、防護板による遮蔽を定量的に確認した。

方向ベクトルは光子の位置ごとに方向を示すため、散乱線源からの光子の挙動を連続的に表示できない。そこで、術者に向かう散乱線が防護板の位置によって変わること直感的に把握できるように、術者の視点においての散乱線源からの方向ベクトルを表示した。

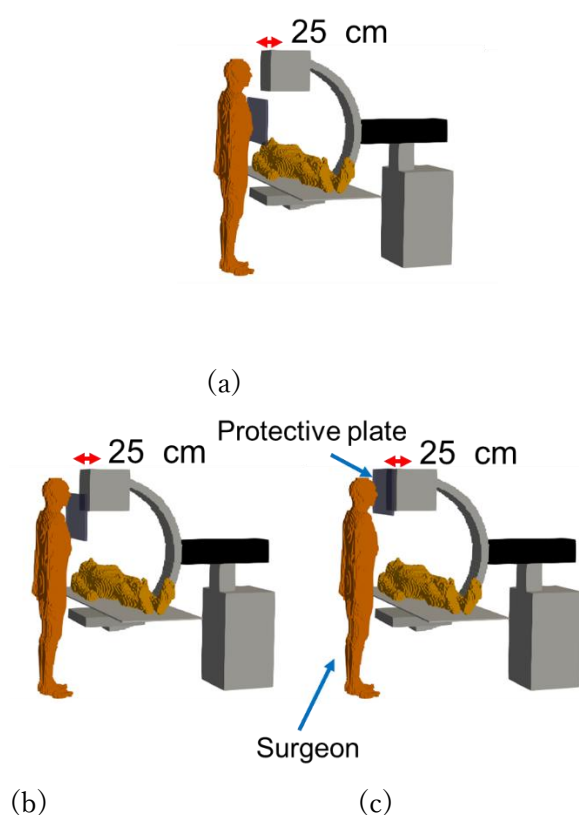


Figure 2 防護板と術者の配置

(a) (b) (c)について、防護板と術者はそれぞれ患者からの距離 25 cm、35 cm である。防護板の床からの高さは、(a) 110 cm、(b) 130 cm、(c) 150 cm である。

B-3. 方向ベクトルを利用した簡易計算

簡易線量分布計算で使用する透視室内のフルエンス分布と周辺線量当量分布を主要な 3 つの

散乱線源ごとに分けてシミュレーションした。主要な 3 つの散乱線源は、ファントムからの散乱、X 線管からの散乱、その他とした (Figure 1)。

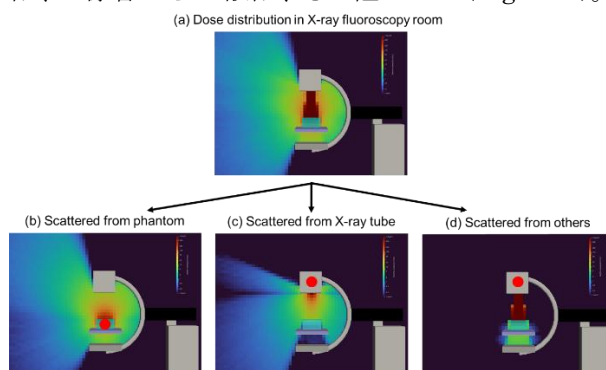


Figure 1. 散乱線源ごとのシミュレーション
(a) X 線透視室内の散乱線を、(b) ファントムからの散乱、(c) X 線管からの散乱、(d) その他に分けて計算した。赤色の点は散乱線源を示す。

簡易線量分布計算法に使用する方向ベクトルデータを PHITS シミュレーションの計算結果を利用して作成した。方向ベクトルは光子の進行方向を示すため、放射線防護板に到達する光子を推測することができる。

まず、透視室内の空間を $5 \times 5 \times 5 \text{ cm}^3$ のボクセルで分割した。PHITS の T-Cross のタリーで、各ボクセルの面を通過する光子数を、面に囲まれた領域に流入する方向と流出する方向を別々にカウントした。1 つのボクセルに対して、12 個の光子数データを取得した。

次に、PHITS シミュレーションで取得したデータを用いて、さらに計算を行った。面に囲まれた領域に流入する方向と流出する方向にカウントした光子数の差をとり、座標軸 xyz 方向を正とした光子数としてベクトル表示した。また、1 つのボクセルは 6 面あるため、向かい合う面の光子数を平均した。それにより、1 つのボクセルに対して、3 個の光子数データを得て、それぞれの座標軸 xyz 方向の方向ベクトルの成分 v_x , v_y , v_z とした。

このように、方向ベクトルの成分 v_x , v_y , v_z とボクセルの中心座標 x_0 , y_0 , z_0 を用いて、ボクセルの中心を原点とした方向ベクトルデータを作成した。

簡易線量分布計算法では、PHITS シミュレーションで得た周辺線量当量分布と作成した方向ベクトルのデータを用いた。方向ベクトルの情

報から放射線防護板で遮蔽される光子を推定し、その光子の線量値に線量低減係数をかけた。ここで、前回の研究で防護板による線量の低減率は最も良い条件で 99%であったため、線量低減係数は 0.01 とした。

放射線防護板で遮蔽される光子の推定では、主要な 3 つの散乱線源ごとに分けたシミュレーションの結果を用いることで、散乱線源を点とし、点から放射状に散乱線が広がることを前提とした。

任意のボクセルについて推定方法を説明する。あるボクセルについて、中心座標 (x_0, y_0, z_0) 、方向ベクトル (v_x, v_y, v_z) とした。光子の飛跡上の任意の点を媒介変数表示で示す。

$$\begin{cases} x_t = x_0 + v_x t \\ y_t = y_0 + v_y t \\ z_t = z_0 + v_z t \end{cases}$$

また、放射線防護板は厚さを無視し平面とし、防護板の上辺の中心、左辺の中心、右辺の中心をそれぞれ、点 $p_1(p_{1x}, p_{1y}, p_{1z})$ 、 $p_2(p_{2x}, p_{2y}, p_{2z})$ 、 $p_3(p_{3x}, p_{3y}, p_{3z})$ とした(Figure3(a))。ここで、点 p_1 ・ p_3 を通る平面の方程式 $ax + by + cz + d = 0$ を求める。このとき、法線ベクトル v_{123} を用いた。

$$\begin{aligned} v_{12} &= p_2 - p_1 \\ v_{13} &= p_3 - p_1 \\ v_{123} &= v_{12} \times v_{13} \end{aligned}$$

平面の方程式は次のように求められる。

$$v_{123x}(x - p_{1x}) + v_{123y}(y - p_{1y}) + v_{123z}(z - p_{1z}) = 0$$

$$v_{123x}x + v_{123y}y + v_{123z}z - (v_{123x}p_{1x} + v_{123y}p_{1y} + v_{123z}p_{1z}) = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} a_1 &= v_{123x}, b_1 = v_{123y}, c_1 = v_{123z}, d_1 \\ &= -(v_{123x}p_{1x} + v_{123y}p_{1y} + v_{123z}p_{1z}) \end{aligned}$$

(1) 式に $x_{t1} = x_0 + v_x t_1, y_{t1} = y_0 + v_y t_1, z_{t1} = z_0 + v_z t_1$ を代入する。

$$t_1 = -\frac{a_1 x_0 + b_1 y_0 + c_1 z_0 + d_1}{a_1 v_x + b_1 v_y + c_1 v_z}$$

$t_1 \leq 0$ のとき、方向ベクトルのバックトレースと点 p_1 ・ p_3 を通る平面が交点 $q(x_{t1}, y_{t1}, z_{t1})$ をもつ。

次に、交点 q が防護板内に存在するかを調べた。防護板の頂点をそれぞれ p_a, p_b, p_c, p_d とし、Figure3(b)(c)のようにベクトルの外積を用いた。交点 q が防護板内画外どちらに存在するかで、外積の符号が異なる。すべての頂点においてベクトルの外積を求めて、隣り合う頂点における外

積の内積を求めると、交点 q が防護板内にあるとき 0 より大きくなる。

そして、方向ベクトルと散乱線源の間に防護板があるかどうかを調べた。散乱線源は (s_x, s_y, s_z) とした。散乱線源を通り、(1)式に平行な平面を求める。

$$v_{123x}(x - o_x) + v_{123y}(y - o_y) + v_{123z}(z - o_z) = 0$$

$$\begin{aligned} v_{123x}x + v_{123y}y + v_{123z}z \\ - (v_{123x}o_x + v_{123y}o_y + v_{123z}o_z) = 0 \quad (1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} a_2 &= v_{123x}, b_2 = v_{123y}, c_2 = v_{123z}, d_2 \\ &= -(v_{123x}o_x + v_{123y}o_y + v_{123z}o_z) \end{aligned}$$

(1) 式に $x_{t2} = x_0 + v_x t_2, y_{t2} = y_0 + v_y t_2, z_{t2} = z_0 + v_z t_2$ を代入する。

$$t_2 = -\frac{a_2 x_0 + b_2 y_0 + c_2 z_0 + d_2}{a_2 v_x + b_2 v_y + c_2 v_z}$$

$t_2 \leq t_1 \leq 0$ のとき、方向ベクトルのバックトレースと散乱線源を通る防護板と平行な平面が交点 $r(x_{t2}, y_{t2}, z_{t2})$ をもつ。

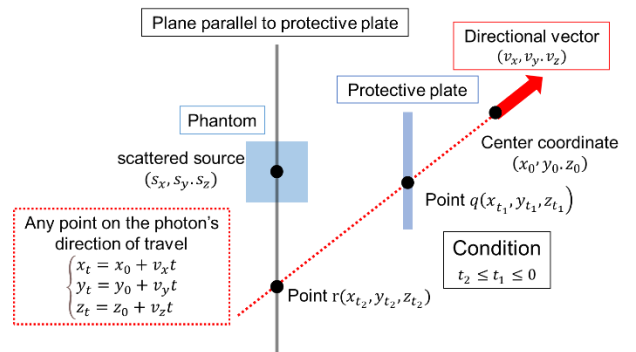
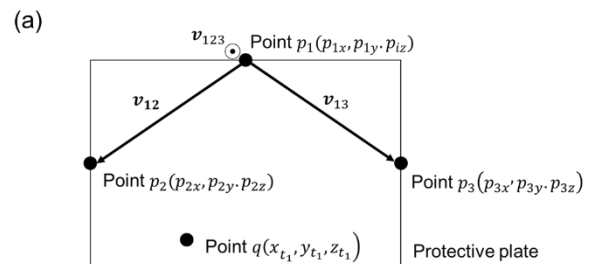


Figure 2 放射線防護板で遮蔽される光子の推定

方向ベクトルのバックトレースと防護板が交点をもち、方向ベクトルと散乱線源の間に防護板が存在する位置関係のとき、防護板で遮蔽される光子だと推定できる。



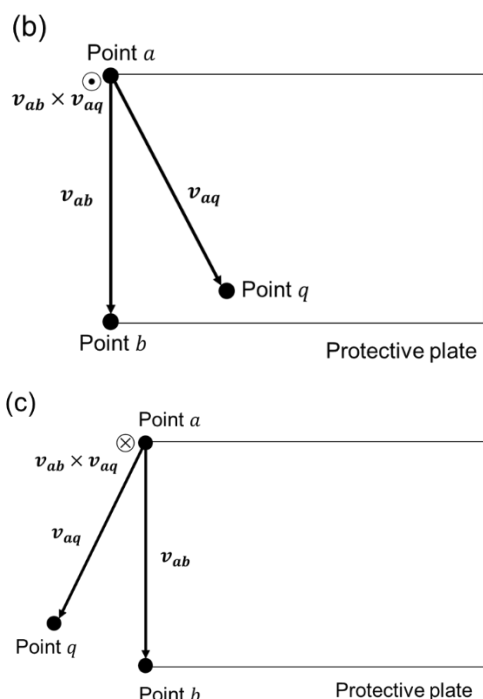


Figure 3 放射線防護板上の点とベクトルの位置関係

(a)は平面の方程式を求めるための法線ベクトル v_{123} を示す。(b)では平面と方向ベクトルのバックトレースの交点が防護板内にあり、(c)では平面と方向ベクトルのバックトレースの交点が防護板外にある。このとき、外積 $v_{ab} \times v_{aq}$ の符号が異なる。

B-4. 簡易線量分布計算法の精度の検証

X 線照射は、X 線透視診断装置 CALNEO CROSS (富士フィルムメディカル株式会社, 東京, 日本) を用いた。周辺線量当量の測定には X 線測定器 RaySafe X2 (Unfors RaySafe, Uggledalsvägen, Sweden) を用いた。照射条件は、管電圧 66 kV、管電流時間積 10 mAs、線源表面間距離 65 cm、焦点-検出器間距離 106 cm、照射野サイズ 46×46 cm² とした。被写体には、30×30×15 cm³ の水ファントムを用いて、水ファントムの中心を照射野の中心に合わせて照射した。移動型防護装置 ML (クラレトレーディング株式会社, 大阪, 日本) を水ファントムの中心から 35 cm の距離に配置し、防護板の配置の高さを変えて、測定した。実測は、各条件で 3 回行い、その平均値を測定値とした。周辺線量当量は、床からの高さ 160 cm のとき、水ファントムの中心から 35 cm の距離で、防護板の床からの

高さを 110 cm、120 cm、130 cm、140 cm で測定した。

PHITS によるシミュレーションは実測時と同様の幾何学的配置を再現し、放射線防護板を配置時の透視室内の散乱線の挙動をシミュレーションした。移動型防護装置 ML (クラレトレーディング株式会社, 大阪, 日本) を用いて、鉛当量 0.80 mmPb、サイズ 37×57 cm²、厚さ 2 cm で再現した。防護板の配置について、Figure 4 に示すように、C アームの角度は AP 方向で、床からの高さ and ファントムからの距離を変えた。防護板がファントムから 25 cm の距離のとき、床からの高さ 110 cm、120 cm、130 cm、140 cm で配置した。そして、術者の頭部の位置で線量を評価するために、ファントムからの距離 35 cm の位置に術者を表示した。術者は ICRP Publication145 標準男性メッシュファントムの表面を用いて再現し、術者の目安とした。

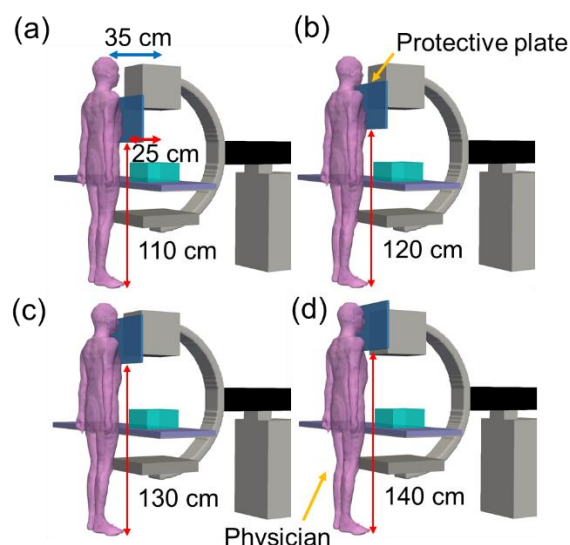


Figure 4. 放射線防護板と術者の配置
術者はファントム中心から 35 cm の位置とした。それに合わせて、放射線防護板をファントム中心からの距離 25 cm、床からの高さ(a)110 cm、(b)120 cm、(c)130 cm、(d)140 cm に配置した。

C. 結果

C-1. シミュレーションの精度の確認

周辺線量当量の計算結果と測定結果を Table 1 に示した。周辺線量当量の計算値と測定値はそれぞれ単位が異なり、そのまま比較することができない。そのため、入射表面線量を用い、相対線量を算出した。相対線量の計算値と測定値

の比の平均値は0.93、標準偏差は0.12となった。

Table 1 各評価点における周辺線量当量の計算値と測定値の比較

Points	Calculated dose($\mu\text{Sv/mGy}$)	Measured dose($\mu\text{Sv/mGy}$)	Calculated dose/Measured dose
1	8.64	7.32	1.18
2	3.30	3.71	0.89
3	7.22	7.03	1.03
4	3.28	3.79	0.87
5	7.66	6.81	1.13
6	3.26	3.51	0.93
7	11.94	14.28	0.84
8	2.70	3.45	0.78
9	11.37	14.20	0.80
10	2.69	3.13	0.86
11	12.08	12.73	0.95
12	2.71	2.82	0.96

C-2. 散乱線方向ベクトルの表示

散乱線方向ベクトルを Figure 3 に示した。赤色の矢印の向きは進行方向、大きさはエネルギーに設定した。方向ベクトルの特徴として、患者から広がることや後方散乱が多いことを確認できた。

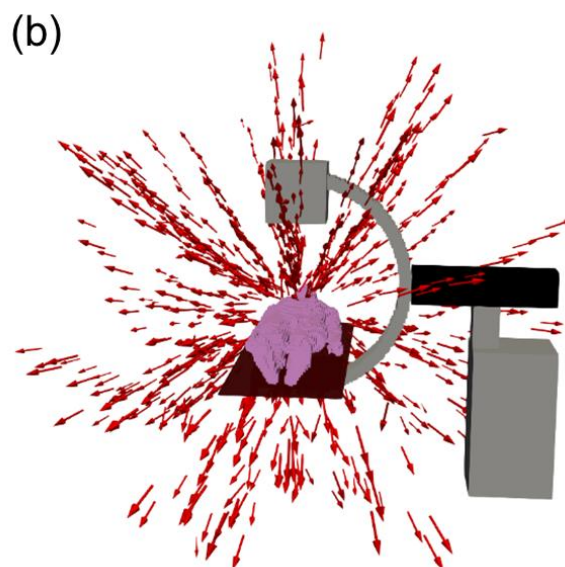
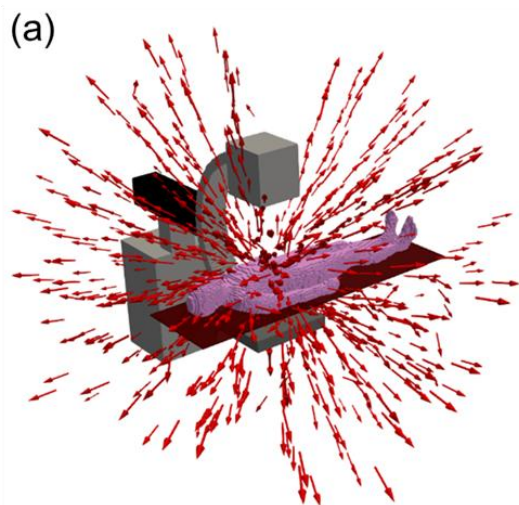


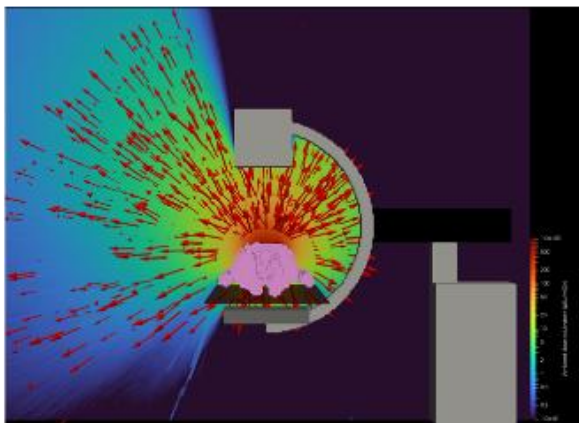
Figure 3 散乱線方向ベクトルの三次元表示
(a)患者の頭側からの表示 (b)患者の足側からの表示

C-2-a. 周辺線量当量分布との比較

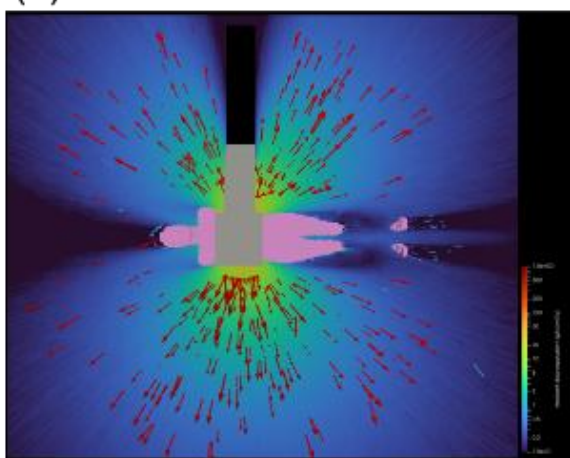
患者からの散乱線方向ベクトルと周辺線量

当量分布の断面図を Figure 4 に示した。線量の勾配が緩やかなところでは、方向ベクトルの矢印の重なりが多いところは線量が高いことを確認できた。また、周辺線量当量はピクセル毎に表示されるが、方向ベクトルは一定の間隔ではなくランダムに表示されることが確認できた。

(a)



(b)



(c)

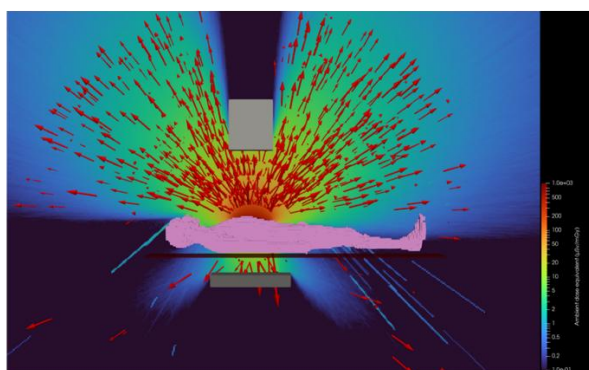
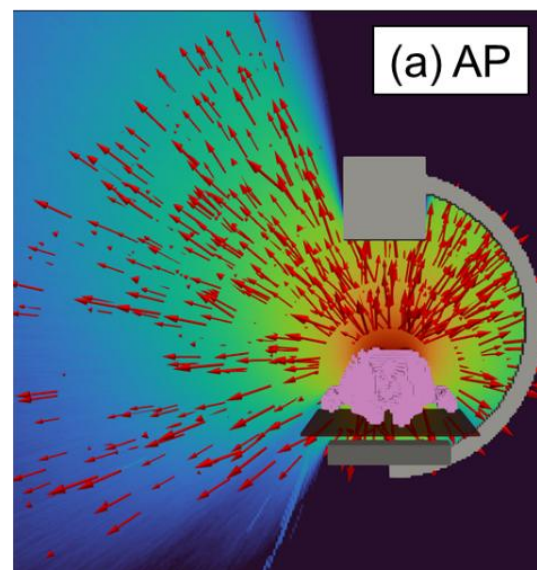


Figure 4 方向ベクトルと周辺線量当量分布を重ね合わせた断面図

(a) $Y = 0$ (照射野中心) の断面図 (b) $Z = -21.65$ (患者中心の高さ) の断面図 (c) $X = 0$ (照射野中心) の断面図

C-2-b. C アームの角度での比較

C アームの角度を変えた同様の表示を Figure 5 に示した。線量分布では、いずれの C アーム角度でも、患者と X 線管の間で線量が高くなることが確認できた。ここで、方向ベクトルを表示することで、線量が高いところは患者から X 線管側への後方散乱であることが分かった。また、周辺線量当量はピクセル毎に表示されるが、方向ベクトルは一定の間隔ではなくランダムに表示されることが確認できた。



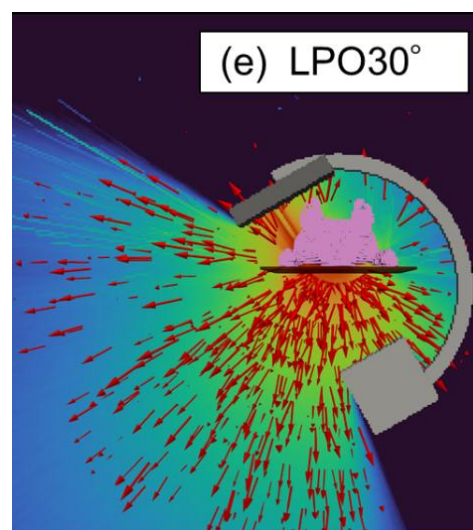
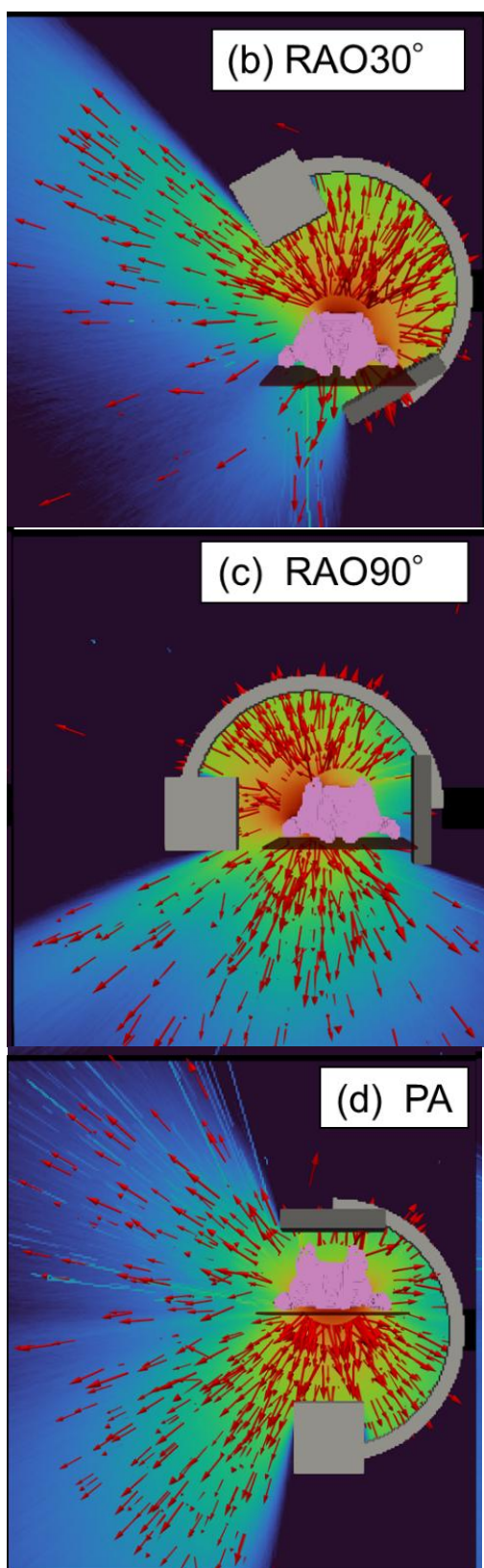


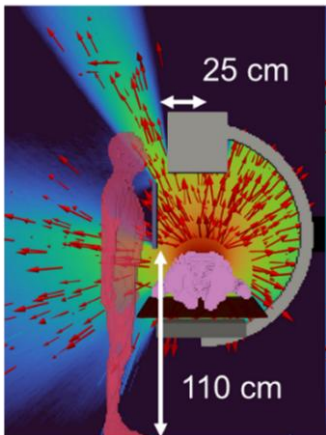
Figure 5 方向ベクトルと周辺線量当量分布を重ね合わせた $Y = 0$ (照射野中心) 断面図
(a) AP (b) RAO30 (c) RAO90 (d) PA (e) LPO30

C-2-c. 防護板に到達する散乱線の方方向ベクトルの評価

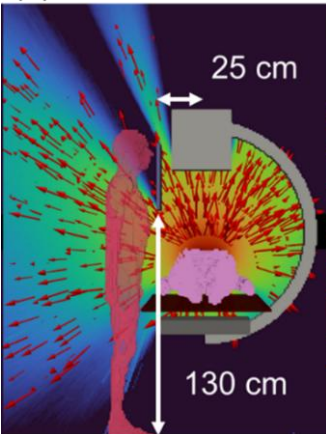
患者からの散乱線の方方向ベクトルと周辺線量当量分布の断面図を表示して、防護板の高さで比較した。断面図は、Figure 5 に示した。防護板を配置した高さによって、防護板に到達する方向ベクトルの向きが異なるため、方向ベクトルがほとんど表示されない延長線上の領域も異なることを断面図から確認できた。

また、防護板を床からの 130cm の高さに配置したとき、防護板に到達する方向ベクトルの延長線上の領域に術者の頭部があることが確認できた。ここで、術者の位置における線量プロファイルを作成して、防護板による遮蔽を定量的に確認した(Fig.7)。防護板による線量の低減率は、防護板を床からの高さ 110 cm、130 cm、150 cm に配置したとき、それぞれ、80.0%、99.1%、16.2%であった。

(a)



(b)



(c)

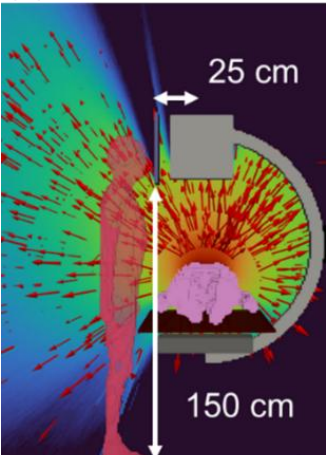


Figure 6 患者からの散乱線の方向ベクトルと周辺線量当量分布の断面図

(a)(b)(c)について、防護板はそれぞれ患者からの距離25cmである。防護板の床からの高さは、(a)110 cm、(b)130 cm、(c) 150 cm

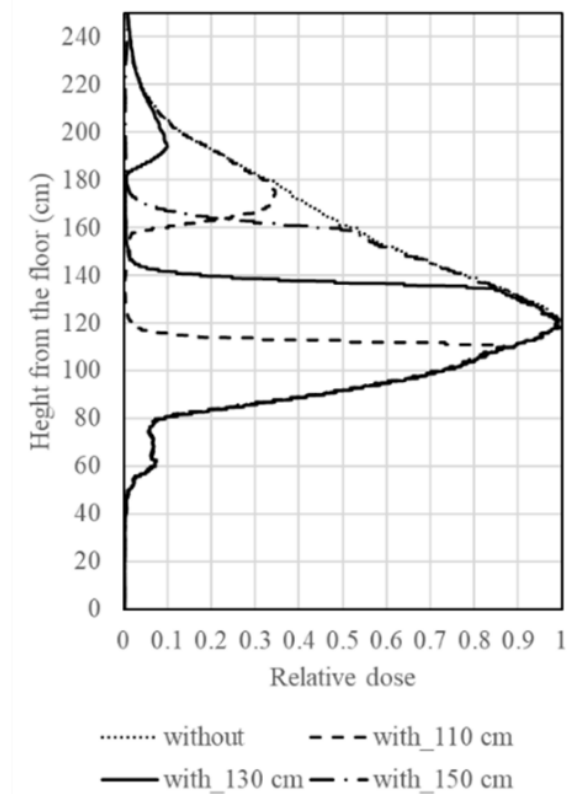
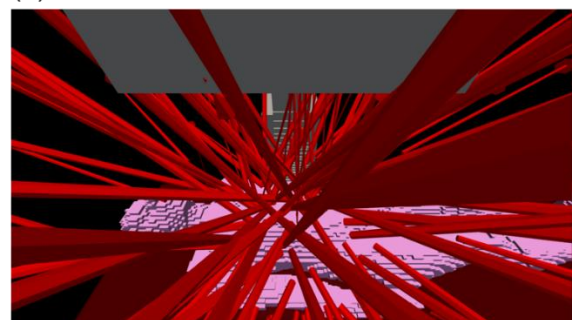


Figure 7 術者の位置（患者から 35 cm）線量プロフィール

患者から 35 cm の位置を術者の位置として、周辺線量当量の相対線量を示す。

術者の視点における散乱線源からの方向ベクトルを Figure 8 に示す。この表示では、患者からの散乱線が術者に向かってくる様子を確認できた。また、防護板により、ベクトルを示す矢印が止まっていることが確認できた。

(a)



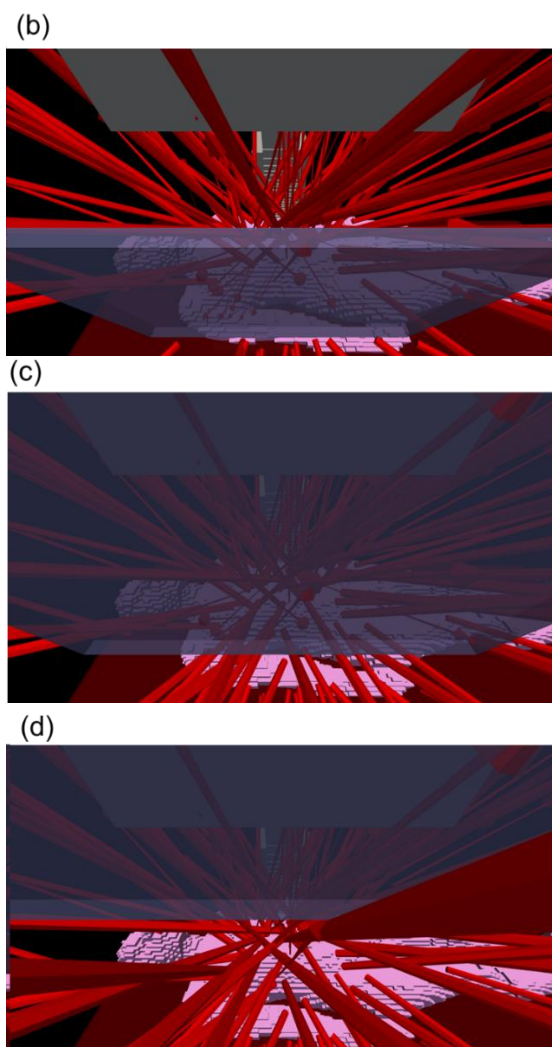


Figure 8 術者の視点からの飛跡

(a)は防護板を配置していない。(b)(c)(d)について、防護板はそれぞれ患者からの距離 25 cm である。防護板の床からの高さは、(b)110 cm、(c)130 cm、(d) 150 cm である。

C-3. 簡易線量分布計算法を利用した線量分布の表示

簡易線量分布計算法を利用した線量分布を Figure 5 と Figure 6 に示した。ここから、防護板で散乱線が遮蔽されていることが確認できた。また、防護板を配置する位置によって線量分布が変化していることが確認できた。

PHITS シミュレーションにかかった時間は平均 20 時間 39 分 46 秒、簡易線量分布計算法にかかった時間は平均 13 秒だった。簡易線量分

布計算法では PHITS シミュレーションと比べて非常に計算時間が短くなった。

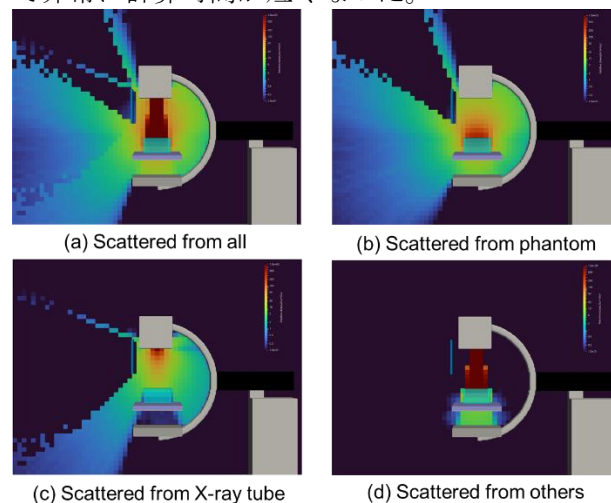


Figure 5 簡易線量分布計算法を利用した線量分布の断面図（照射野中心 ($y = 0$))
放射線防護板をファントム中心からの距離 25 cm、床からの高さ 130 cm に配置時の簡易線量分布計算法を用いて計算した線量分布を示す。
(b)ファントムからの散乱、(c) X 線管からの散乱、(d)その他であり、(a)は(b)-(d)を足し合わせたものである。

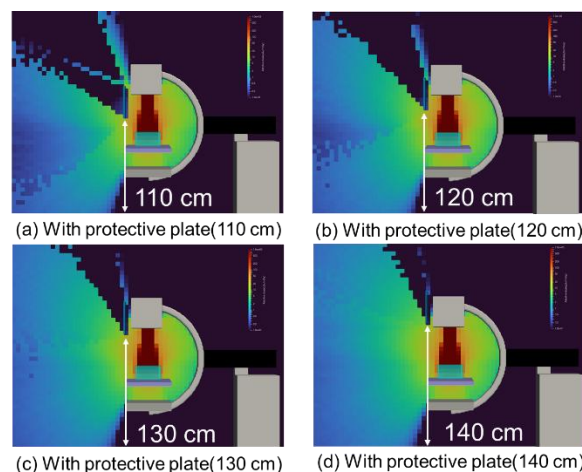


Figure 6. 防護板配置条件を変えた時の簡易線量分布計算法を利用した線量分布の断面図（照射野中心 ($y = 0$))
放射線防護板をファントム中心からの距離 25 cm、床からの高さ(a)110 cm、(b)120 cm、(c)130 cm、(d)140 cm に配置した時の簡易線量分布計算法を用いた線量分布を示す。

C-4. 簡易線量分布計算法の検証

術者の頭部の位置の周辺線量当量と防護板による低減率を Table 1 に示す。周辺線量当量のシミュレーション値と測定値はそれぞれ単位が異なり、そのまま比較することができない。そのため、防護板による低減率を算出した。実測と PHITS シミュレーションの低減率の差は 6% 以内であった。一方で、実測と PHITS シミュレ

ーション、簡易線量分布計算法の低減率の差は、防護板の床からの高さ 110 cm、120 cm、130 cm のとき低減率の差は 10% 以内であった。しかし、防護板の床からの高さ 140 cm のとき、実簡易線量分布計算法は他より、低減率が非常に低かった。

Table 1 術者の頭部の位置における線量評価

Height from floor(cm)	Dosimetry		PHITS simulation		Caluculation method	
	Dose(μ Sv)	Reduction(%)	Dose(μ Sv/mGy)	Reduction(%)	Dose(μ Sv/mGy)	Reduction(%)
Without	6.94		5.20			
110	0.533	92.3	0.287	94.5	0.0520	99.0
120	0.231	96.7	0.0612	98.8	0.0520	99.0
130	0.336	95.2	0.104	98.0	0.0500	99.0
140	1.55	77.6	1.47	71.8	4.97	4.41

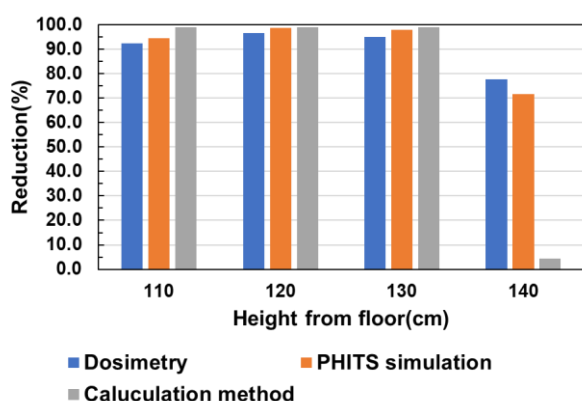


Figure 7 防護板による低減率の比較

実測、PHITS シミュレーション、簡易線量分布計算法それぞれの防護板による低減率を比較した。防護板の床からの高さ 110 cm、120 cm、130 cm のとき低減率の差は 10% 以内であった。しかし、防護板の床からの高さ 140 cm のとき、

実測と PHITS シミュレーションの差は 10% 以内であったが、簡易線量分布計算法は他より、低減率が非常に低かった。

簡易計算の精度を検証するために、防護板後方の簡易計算と PHITS シミュレーションの線量値の差と比の分布を表示した(Figure 8)。防護板後方の領域は、計算値がシミュレーション値を下回ったところが多く、領域の境界付近では、計算値がシミュレーション値を上回ったところが見られた。簡易線量分布計算では、防護板で遮蔽される光子の線量値を 0.01 倍しているため、防護板後方への散乱線の回りこみを考慮することができない。また、簡易線量分布計算法と PHITS シミュレーションの線量値の差では、最小値は -14.6、最大値は 8.37 であった。簡易線量分布計算法と PHITS シミュレーションの線量値の比では、最小値は 0.0115、最大値は 6.48 であった。

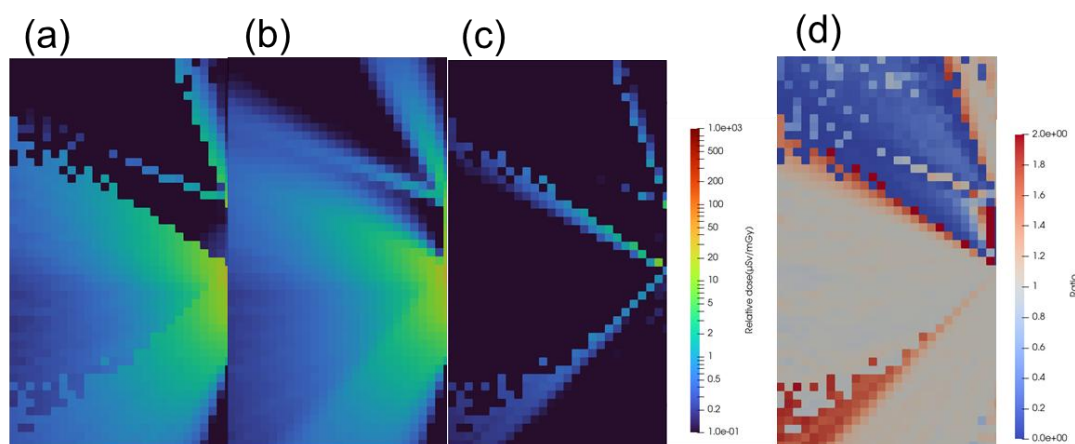


Figure 8 防護板後方の簡易計算と PHITS シミュレーションの線量値の差と比の分布の断面図（照射野中心（ $y = 0$ ））

防護板後方の(a)簡易線量分布計算法と(b)PHITS シミュレーションの線量値の(c)差と(d)比を求め、それぞれ分布を示した。(d)では、計算値がシミュレーション値を下回るときが青色、上回るときが赤色、同等のときは灰色で表示される。

Table 2 簡易線量分布計算法と PHITS シミュレーションの線量値の差

Height from floor (cm)	Min	Max	Mean
110	-14.6	8.37	-0.0119
120	-12.7	4.95	0.00699
130	-10.1	7.01	0.0196
140	-7.82	5.02	0.0194

Height from floor (cm)	Min	Max	Mean
110	0.0115	5.65	0.921
120	0.0117	4.17	0.992
130	0.0126	6.00	1.02
140	0.0121	6.48	1.01

Table 3 簡易線量分布計算法と PHITS シミュレーションの線量値の比

ファントムからの距離 35 cm の位置を術者の位置として線量プロファイルを作成し、PHITS シミュレーションと簡易線量分布計算を比較した。線量プロファイルから防護板の後方の領域の境界周囲では差が大きくなった。

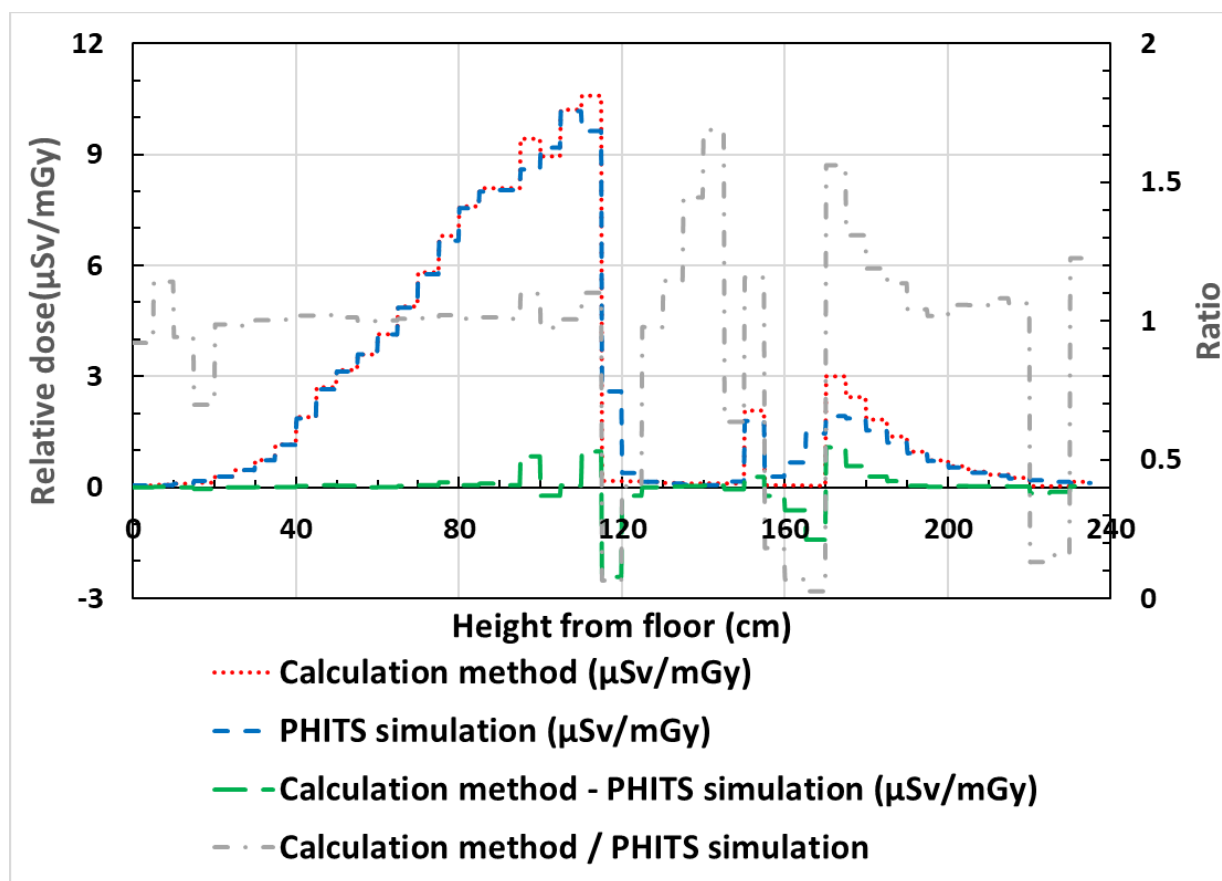


Figure 9 術者（ファントムからの距離 35 cm の位置）の位置の線量プロファイル
簡易線量分布計算法と PHITS シミュレーションの相対線量とその差と比をグラフ上に示した。

D. 考察

周辺線量当量の計算値と測定値の比較について、

計算値と測定値の差は、平均約 7% であった。

しかし、差は最大 22 % だった。シミュレーションによる計算値について、X 線管からの距離 50 cm の測定点では線量が過大評価され、その他の測定点では線量が過小評価されていた。原因として、X 線管の内部構造のデータが公開されていないため、X 線管の再現が不十分であったと考えられる。JIS Z 4333「X 線及びγ線用線量当量率サーベイメータ」より、相対誤差の許容範囲は±20 % であるため、X 線管の再現をより正確にする必要があると考える。

方向ベクトルと周辺線量当量との比較について、周辺線量当量分布で線量の勾配を知ることができるが、方向ベクトルを表示することで、散乱線源からの散乱線の進行方向を知ることができる。C アームの角度を変えると、いずれの角度も X 線管側への散乱線が多かった。そのため、術者は X 線管側に立つことを避けることで被ばくを低減できると考えられる。

水晶体の放射線防護における防護板の配置について、散乱線は患者から放射状に広がるため、患者から同じ距離離れたとき、高さによって散乱線の進む方向は異なり、防護板に到達した散乱線の進む方向の延長線上の領域は遮蔽効果が高かった。そのため、患者と術者の頭部の間に防護板を配置すると、患者から術者の頭部に向かう散乱線に対して防護板を配置できるため、遮蔽効果が高くなると考えられる。しかし、防護板をより低い位置に配置すると防護板の上を散乱線が通過し、防護板をより高い位置に配置すると防護板の下から散乱線が入り込むため遮蔽効果は低くなると考えられる。このように、散乱線源からどのような方向で散乱線が飛んでくるのかという散乱線の方法の可視化によって防護板の適切な使用法を検討できると考える。

簡易線量分布計算法では、モンテカルロシミュレーションと比べて計算時間は非常に短くなった。防護板の位置による線量分布の変化を簡単に多くの結果を示すことができると考える。

簡易線量分布計算では、防護板後方の領域の領域は大部分の線量値が過小評価になる。しかし、防護板後方の領域の境界では、線量値が過大評価になる。また、実測や PHITS シミュレーションとの差が大きくなる傾向がある。簡易線量分布計算法では、防護板の遮蔽の影響を受け

るおおよその領域を知ることができる。しかし、空間の線量値は実測や PHITS シミュレーションとの差が大きい場合もあるため、線量値の確認に用いることは難しい。

E. 結論

散乱線の方法ベクトルと飛跡を三次元的に可視化して、散乱線が患者からどのように飛んで来るのか、また、防護板でどのように散乱線が遮蔽されているのかについて視覚的に示すことができた。そして、患者と術者の頭部の間の高さに防護板を配置すると水晶体の放射線防護に有効であると視覚的に示すことができた。

簡易計算では、防護板を任意の位置に配置した時の線量分布を短時間で計算し、防護板の位置による線量分布の変化を示すことができた。

F. 健康危険情報

なし

G. 研究発表

1. 論文発表

1. Kyoko Hizukuri, Toshioh Fujibuchi, Hiroyuki Arakawa, Directional Vector Visualization of Scattered Rays in Mobile C-arm Fluoroscopy, Radiological Physics and Technology, 17(1), 288-296, 2024
2. Hizukuri K, Fujibuchi T, Han D, Arakawa H, Furuta T, Directional vector-based quick evaluation method for protective plate effects in X-ray fluoroscopy (DQPEX), Radiological Physics and Technology, 18, 196 - 208, 2025.

2. 学会発表

1. Kyoko Hizukuri, Toshioh Fujibuchi, Hiroyuki Arakawa. Consideration of appropriate barrier placement methods using visualization of scattered radiation in X-ray fluoroscopy. The 79th annual meeting of the JSRT, Yokohama, April 13-16, 2023.
2. Kyoko Hizukuri, Toshioh Fujibuchi, Hiroyuki Arakawa. Proposal of Direction Vector Visualization of Scattered Radiation for the Purpose of Appropriate Use of Radiation Protection Plates. The 7th International Symposium on The System of Radiological Protection (ICRP 2023), Pre-recorded video, November 6-9, 2023.

3. Kyoko Hizukuri, Toshioh Fujibuchi, Hiroyuki Arakawa. Direction Vector Visualization of Scattered Radiation for fluoroscopy by PHITS. Joint Symposium on Nuclear Data and PHITS in 2023, Ibaraki, November 15-17, 2023.
 4. 檜作響子, 藤淵俊王, 荒川弘之. X 線透視における散乱線の方向ベクトル分布の可視化. 医用画像情報学会 令和 5 年度春季 (第 198 回) 大会, 福岡, 2024 年 2 月 3 日.
 5. Kyoko Hizukuri, Toshioh Fujibuchi, Hiroyuki Arakawa. A study of a simplified dose calculation method using directional vectors when placing radiation protective plates. The 80th annual meeting of the JSRT, Yokohama, April 11-14, 2024.
 6. Kyoko Hizukuri, Toshioh Fujibuchi, Simplified Dose Distribution Calculation Method for Placing Radiation Protective Plate Using Directional Vectors, The 13th Korea - Japan Joint Summer Workshop in Radiological Sciences and Technology, Busan, Sep. 2-14, 2024.
 7. Kyoko Hizukuri, Toshioh Fujibuchi, Hiroyuki Arakawa, Donghee Han. Development of simplified dose distribution calculation program for radiation protective plate placement using directional vectors. The 24th Asia-Oceania Congress of Medical Physics (AOCMP 2024), Penang, October 10-13, 2024.
 8. Kyoko Hizukuri, Toshioh Fujibuchi, Han Donghee, Development of Directional vector-based Quick evaluation method for Protective plate Effects in X-ray fluoroscopy (DQPEX), PHITS Workshop and Intermediate Course at Japan Atomic Energy Agency in Tokai, Japan 2025, February 18-21, 2025
 - 4.
- H. 知的財産権の出願・登録状況
(予定を含む。)
1. 特許取得
なし
 2. 実用新案登録
なし
 3. その他
なし

労災疾病臨床研究事業費補助金
総合（令和4年度～令和6年度）分担研究報告書
デジタルトランスフォーメーションを活用した医療従事者の被ばく低減プログラムの開発と有効性の検証（220201）

仮想現実技術を利用した X 線透視時の散乱線の方角ベクトルの可視化教材の開発

研究分担者 藤淵 俊王 九州大学大学院医学研究院保健学部門医用量子線科学分野 教授

研究要旨

【目的】本研究では仮想現実（virtual reality : VR）空間にて X 線透視時の患者からの散乱線の進行方向を方向ベクトルとして可視化する教材を作成することを目的とした。【方法】モンテカルロコード Particle and Heavy Ion Transport code System (PHITS) にて、X 線透視時の散乱線の方角ベクトル分布を作成した。三次元可視化ソフト ParaView にて、散乱線の方角ベクトル分布を赤色の矢印として可視化した。VR ヘッドセットである Meta Quest 3 を用い、散乱線の方角ベクトル分布を確認した。【結果】VR 空間にて散乱線の進行方向を三次元的に可視化し、任意の方向から確認できた。また、2 次元および三次元線量分布と重ね合わせることで放射線防護板の遮蔽効果を視覚的に確認できた。【結語】VR 空間では、透視装置、患者ファントム、防護板と自分の視点の位置関係と紐づけて散乱線の進行方向を把握できるため、教育教材として有用であると示唆される。

研究協力者

檜作 響子

九州大学大学院医学系学府保健学専攻医用量子線科学分野

A. 研究目的

放射線診療において X 線透視は消化管や泌尿器の造影検査だけでなく、ステント留置や血管形成術、脱臼整復、生検や人工関節置換術など幅広い診療科で検査や治療に使用されている。非侵襲的に患者の体内をリアルタイムに観察できる一方、X 線透視業務に携わる医療従事者は患者などからの散乱線により多く被ばくする可能性がある¹⁻⁵⁾。特に患者付近での透視業務量の多い医師や看護師においては、眼の水晶体の被ばくが等価線量限度を超える可能性が指摘されている⁶⁻⁹⁾。外部被ばくの放射線防護の基本原則は、距離、時間、遮蔽である¹⁰⁾。通常医療従事者は、散乱線源である X 線管や患者と手技や診療業務に支障のない範囲で距離を取ることで不必要な被ばくを回避することができる¹⁾。しかし、X 線透視ガイド下の手技では、患者や X 線管と距離を取ることが困難であり、積極的な遮蔽による防護対策をする必要がある。

遮蔽の手段には、放射線防護衣、放射線防護眼

鏡、放射線防護板、放射線防護ドレープなどが挙げられる¹¹⁻¹⁵⁾。これらの中で術者用の防護板として、天井吊り下げ式のものが使われるが、患者付近での手技への邪魔にならないような配置と重量の関係から大きなものが用意できず、術者の頭部等特定の部位の防護が必要な箇所に移動させて使用する。そのため、他の遮蔽手段とは異なり、防護効果を考慮した適切な使用方法を理解することが求められる。防護板の効果的な使用には、散乱線の広がりや進行方向を正確に把握することが重要である。先行研究では X 線透視における散乱線の分布を可視化する試みが報告されている¹⁶⁻¹⁸⁾が、進行方向の情報を加えることで散乱線源の場所や散乱線の挙動をより具体的に視覚化でき、防護板の効果的な使用方法の理解に有用であると考えられる。

散乱線は X 線焦点から発生する直接線が絞りや患者、寝台等様々な物体との相互作用により発生し 3 次元に広がることから、その進行方向

を理解する上で X 線管、患者、医療従事者の位置関係が重要である。医療従事者に向かってくる散乱線を、医療従事者の様々な位置や視点から容易に観察するためには、仮想現実 (virtual reality : VR) 技術を活用することが有効と考えられる。VR 技術は、現実の環境を仮想空間で再現し、映像や音響などのデジタル情報を組み合わせることで、仮想世界における没入感のある情報提供と体験型学習を同時に可能にする利点を持つ。そのため、近年では医学教育をはじめ様々な教育現場で活用されている^{19,20)}。この技術を X 線透視に応用し、防護板の使用方法を VR 空間内で再現することで、効果的な学習環境を提供できると考えられる。

本研究の目的は、医療従事者が効率的に防護板の適切な使用方法を学習するために、散乱線の線量分布と共に進行方向を方向ベクトルとして VR 空間に可視化する教育教材を開発することである。本研究では、VR 教材を活用し、医療従事者への散乱線の進行方向と防護板の設置位置や角度による被ばく低減効果を直感的に理解できる学習方法を提供することを目指している。この新しい教育手法は、防護板の適切な使用を促進し、医療現場における医療従事者の放射線被ばくリスクの低減に寄与することが期待される。

B. 方 法

B-1 方向ベクトル分布と周辺線量当量分布の作成

本研究では、モンテカルロコードである Particle and Heavy Ion Transport code System (PHITS) version 3.34 を使用して、C アーム式 X 線透視装置 (CALNEO CROSS; 富士フィルム株式会社、東京) (以下、C アーム装置) で照射したときの患者を模したファントムからの X 線透視室内の散乱線の挙動をシミュレーションした²¹⁾。PHITS では、患者頭側方向 310 cm、左右方向 270 cm、床天井方向 230 cm の仮想 X 線透視室内に、X 線管、コリメータ、C アーム装置、寝台を再現し、3 次元の光子フルエンス分布を 10 cm 間隔で計算した。本 C アーム装置はオーバーテーブル X 線管方向、アンダーテーブル X 線管の両方に X 線管の位置を設定することが可能である、手術ではアンダーテーブル X 線管の配置で透視をすることが多いが、被写体にできるだけ画像検出器を近づける目的からオー

バーテーブル X 線管で照射することもある。今回は放射線防護用教材の開発を目的としており、被写体からの後方散乱による医療従事者への影響が大きいことからオーバーテーブル X 線管の配置とした。X 線管のターゲットから発生する X 線源は、管電圧 66 kV、ターゲット角 9 度、総濾過 2.5 mmAl で、診断領域 X 線スペクトル近似計算ソフト X-ray-Spectrum (Hideki Kato, <https://hidekikato1952.wixsite.com/radiotechnology>) を用いて 0.5 keV ごとの診断 X 線エネルギースペクトルを算出し、焦点からコーンビームとして照射されるようシミュレーションに組み込んだ。66 kV は実際の C アーム装置において人体ファントム (PBU-60, 株式会社京都科学、京都) の腹部に照射した際の自動露出機構で設定された値である。先行研究において、寝台周囲 1.5 m の範囲におけるシミュレーションの周辺線量当量の計算精度は X 線照射野中心から周囲 2 m の評価点 12 点において平均 10% である²²⁾。また、寸法 37×57 cm²、厚さ 2 cm、鉛当量 0.8 mmPb の防護板 (ML-II 型、クラレトレーディング株式会社、大阪) を使用し、防護板後方の周辺線量当量率のシミュレーションによる計算値とサーベイメータによる測定値の差が 7% 以内であることを確認した²³⁾。本研究ではシミュレーションにより検査室内の相対的放射線の分布を評価しており、管電流によって相対的な分布は変化しないことから、シミュレーション上では管電流の情報は考慮させていない。シミュレーション上の患者のモデルには、International Committee of Radiological Protection (ICRP) Publication 145 で公開されている標準男性メッシュファントムを使用した²⁴⁾。C アームの角度は床に対して垂直とし、X 線照射方向は天井から床へ方向で患者は仰臥位とし、照射野中心は腹部、焦点患者表面間距離は 65 cm、焦点検出器間距離は 106 cm、照射野は画像検出器の位置において 46 cm × 46 cm とした。光子、電子のカットオフエネルギーは 10 keV、シミュレーションのヒストリー数は 1×10⁸ とした。

X 線を照射した場合、散乱線に比べ直接線の成分は桁違いに多い。今回は検査室内にいる医療従事者の放射線防護教育の観点から全体に広がる散乱線を観察することが目的であるため X 線を照射した際の直接線の成分を除き、患者からの散乱線のみを表示させた。

方向ベクトル分布の作成には、透視室における PHITS による光子フルエンスの 3 次元分布データの計算結果を利用した。310 × 270 × 230

OS	Windows 11 Education
CPU	AMD Ryzen 9 5900HS
GPU	NVIDIA GeForce RTX 3080 (Laptop)
Software	Steam VR 2.8.8 Meta Quest Link ParaView 5.13.0

cm³の室内の空間を 10 × 10 × 10 cm³のボクセルに分割し、ボクセルの各面を通過する光子数を方向別に記録して、ボクセルごとに平均化した²³⁾。座標軸の正方向に対してベクトル表示し、データベース化した。周辺線量分布の作成には、3次元のフルエンス分布から、PHITSに含まれるフルエンス-周辺線量当量換算係数を用いて変換した。

B-2 VR空間での方向ベクトル分布の表示

三次元可視化ソフト ParaView ver. 5.13.0 (Kitware, Inc., NY, USA) を使用して散乱線の方向ベクトルを赤色の矢印として表示した。ParaView VR 機能を利用して VR 空間に方向ベクトル分布を表示した。VR ヘッドセット (Meta Quest 3; Meta Platforms, Inc., CA, USA) を使用した。PC と VR ヘッドセットの外観を Fig. 1 に示す。VR ヘッドセットの動作環境を Table 1 に示す。



Fig. 1 PC と VR ヘッドセットの外観
Table 1 VR ヘッドセットの動作環境

C. 結 果

C-1 VR空間での方向ベクトル分布の表示

防護板のない状態での患者からの散乱線の方
向ベクトル分布を VR 空間に表示したものを
Fig. 2 に示す。VR ゴーグル装着者は、現実空間
を歩き回ること、VR 空間上の散乱線の進行方
向を矢印として任意の方向から確認できた。矢
印の形状や色、間隔は、ParaView 上で調整する
ことが可能である。本動作環境では画像の遅延
はなくスムーズに VR ゴーグル上に表示できた。

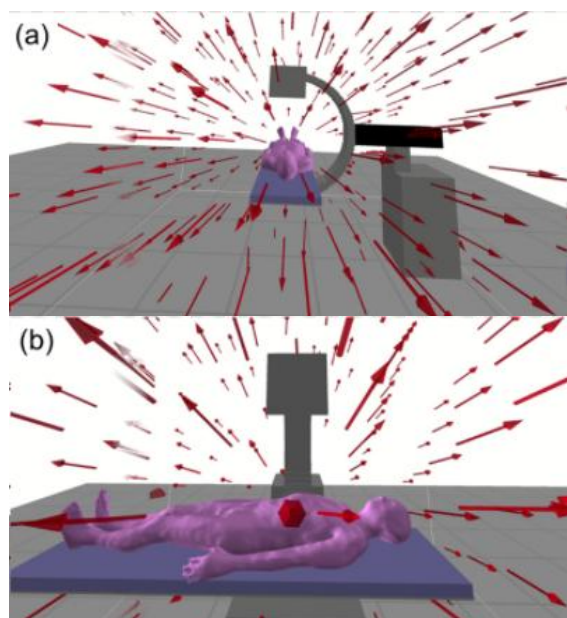


Fig. 2 VR 空間における患者からの方向ベ
クトル分布の表示。赤色の矢印は方向ベクトルを
示す。ピンク色の物体は患者モデルのファント

ムを示す。(a)患者ファントムの頭部方向から見た図を示す。(b)患者ファントムの側面方向から見た図を示す。

C-2 放射線防護板がある場合のベクトル表示

散乱線の方法の情報から防護板による散乱線の遮蔽効果を視覚的に理解できるように、患者からの散乱線の方法ベクトル分布に防護板を配置して VR 空間に表示したものを Fig. 3 に示す。X 線管の近くに配置した半透明の黄色で示しているものが防護板である。Figure 3(a)に示すように、患者からの距離 25 cm、床からの高さ 120 cm の位置に防護板を配置した。Figure 3(b)では、患者の傍の位置を医療従事者の視点として示すと、矢印により散乱線が医療従事者に向かってきていることを視覚的に確認できる。

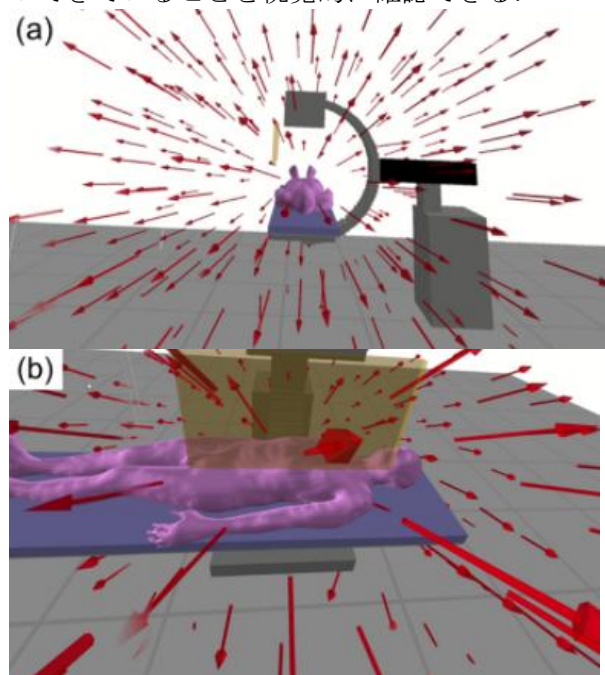


Fig. 3 防護板を配置した時の VR 空間における患者からの方向ベクトル分布の表示。半透明の黄色の物体が防護板を示す。(a)患者から 25 cm の距離、床から 120 cm の高さに防護板を配置した。(b)床から 120 cm の高さに防護板を配置した場合の医師の視点を示す。

C-3 2 次元周辺線量当量分布との重ね合わせ表示

2-2 の防護板を配置した状態での方向ベクトル分布に周辺線量当量の二次元断面を重ね合わせ

せたものを Fig. 4 および Fig. 5 に示す。Figure 4 では患者横断面に平行な周辺線量当量分布、Fig. 5 では患者の冠状断面に平行な周辺線量当量分布を示している。周辺線量当量の断面は、ParaView 上で任意の位置に変更可能である。また分布の透明度を調整し、断面の後方にある X 線装置や患者も確認することが出来る。方向ベクトル分布と周辺線量当量の断面を重ね合わせることで、散乱線がどのように進行しているかだけでなく、防護板による散乱線の遮蔽効果と線量の低減を視覚的に確認できる。周辺線量当量分布を表示することで線量が高く比較的危険な位置や、低く安全な位置を視覚的に認識することが出来る。

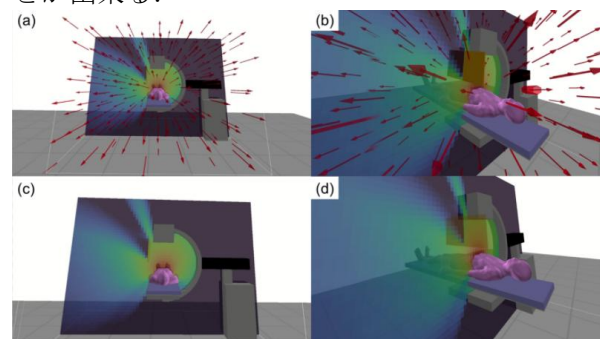


Fig. 4 防護板配置時の VR 空間における患者からの 2 次元線量分布と方向ベクトル分布の表示。照射野中心における患者の軸断面を示す。防護板は患者から 25 cm の距離、床から 120 cm の高さに配置した。(a) 2 次元線量分布と方向ベクトル分布を表示した。患者の頭部方向から見た図を示す。(b) 2 次元線量分布と方向ベクトル分布を表示した。患者の側面方向から見た図を示す。(c) 2 次元線量分布を表示した患者の頭部方向から見た図を示す。(d) 2 次元線量分布を表示した。患者の側面方向から見た図を示す。

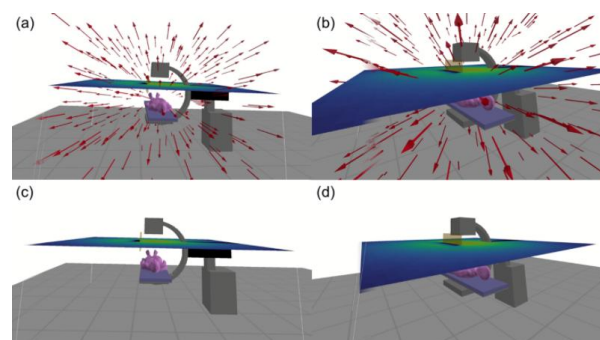


Fig. 5 防護板配置時の VR 空間における患者からの 2 次元線量分布と方向ベクトル分布の表示. 照射野中心における患者の冠状断面を示す. 防護板は患者から 25 cm の距離, 床から 120 cm の高さに配置した. (a) 2 次元線量分布と方向ベクトル分布を表示した. 患者の頭部方向から見た図を示す. (b) 2 次元線量分布と方向ベクトル分布を表示した. 患者の側面方向から見た図を示す. (c) 2 次元線量分布を表示した患者の頭部方向から見た図を示す. (d) 2 次元線量分布を表示した. 患者の側面方向から見た図を示す.

C-4 3 次元周辺線量当量分布との重ね合わせ表示

2-2 の方向ベクトル分布に周辺線量当量分布の 3 次元等線量曲面を重ね合わせたものを Fig. 6 に示す. 3 次元等線量曲面のへこみにより防護板による散乱線の遮蔽効果を確認できる. また防護板による散乱線の遮蔽効果による防護板後方の線量の違いを 2 次元線量分布により確認できる. 3 次元等線量曲面は, 3 次元の線量ボリュームデータから ParaView 上でしきい値設定により指定した値のボクセルのみを 3 次元空間上に表示させることで可視化しており, このしきい値は自由に設定することが可能である.

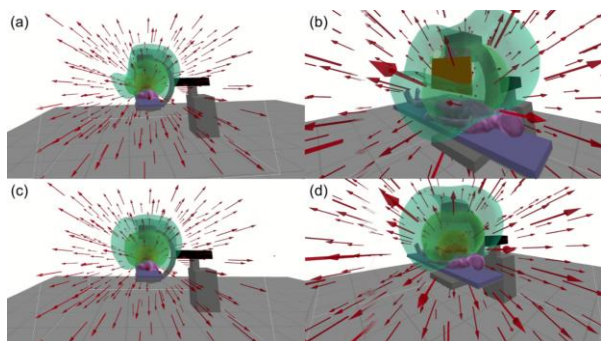


Fig. 6 VR 空間における患者からの 3 次元線量分布と方向ベクトル分布の表示. (a)患者から 25 cm, 床から 120 cm の高さに防護板を配置した場合の 3 次元線量分布と方向ベクトル分布を表示した. 患者の頭部方向から見た図を示す. (b)防護板を配置した場合の 3 次元線量分布と方向ベクトル分布を表示した. 患者の側面方向から見た図を示す. (c) 3 次元線量分布と方向ベクトル分布を表示した. 患者の頭部方向から見た図を示す. (d) 3 次元線量分布と方向ベクトル分布を表示した. 患者の側面方向から見た図を示す.

D. 考 察

今回開発した VR 教材により, VR 空間にて方向ベクトル分布を矢印として表示することで, 透視装置, 患者, 防護板, 自分の視点の位置関係と紐づけて散乱線の進行方向を確認することができる. そのため, 患者の傍に立ったときに散乱線がどこから自分の方に向かってくるかがモニタ画面を見るよりも容易に視覚的に理解しやすい. VR 教材での視線の変更は, ボリュームレンダリング等の 3 次元画像を表示するソフトウェアのようなマウスによる操作でなく, VR ゴーグルを着用している頭を動かすことで微妙な視線を容易に変化させることが出来る. また VR ゴーグルを着用することで現実世界が完全に遮断され, 余計な物のない没入感のある仮想空間で見たいものだけを表示させることが出来る. これらのことから, VR 空間で学習する教育教材では, より主体性をもって学習できると考える.

本 VR 教材では, 使用者の任意の立ち位置や移動に合わせてリアルタイムに確認出来ることから, 放射線の相互作用や挙動に関する深い知識を持っていない医療従事者に対しても散乱線の広がり直感的な理解が可能であり, 散乱線がどこから自分に飛んでくるかのイメージを容易にすることが出来る. 散乱線源をイメージできれば, 診療に支障のない範囲で近づかないようにする, 線源と自身の間に遮蔽体を配置することで効果的な放射線防護対策ができ, 本教材による散乱線の挙動の理解は医療現場における医療従事者の放射線被ばくリスクの低減に寄与すると考えられる.

本教材では, オーバーテーブル X 線管方向での照射の散乱線の挙動を再現した. アンダーテーブル X 線管方向の場合や側面方向, 他の装置や放射線防護具に関してもシミュレーションすれば表示可能であり, 様々な手技や検査での VR 放射線防護教材に拡張させることが可能である.

本 VR 教材を使用する際の注意点として下記のことが挙げられる. 一点は VR ヘッドセットを被ると現実空間が見えなくなることである. 本教材では VR ヘッドセット装着者が周囲を歩くことにより仮想的な検査室にいるような疑似体験をすることが出来るが, そのためには装着者が机や物と衝突することが無いよう, 少なくとも 2 m 四方の広い空間を用意する必要がある. また VR 教材の使用に関して, 個人差はあるも

の酔いやすいという指摘もある。そのため、使用時には体調に注意して無理に長時間使用しないようにする必要がある。

今回開発した VR 教材において、方向ベクトルは散乱線の進行方向を示すが、線量の大小を示すことはできなかった。そのため、防護板の効果を理解するためには線量分布を重ね合わせる必要がある。方向ベクトル分布単独で防護板の効果を視覚的に示すためには、線量の大きさによって、色または大きさを変えることで実現できると考えられる。また、矢印をより見やすくするための改善策として重複を避けるために表示本数を調整したり、現時点での ParaView の機能には搭載されていないが、カラードップラーのように近づいてくる矢印は赤く、遠ざかる矢印は青く表示することによって色覚的に散乱線の方向をより認識しやすくなる可能性もある。

本研究の限界として以下の 3 点が挙げられる。1 点目は、方向ベクトルの表示方法である。今回は VR 空間で表示したが、実際の透視装置に方向ベクトルを重ね合わせるなど、任意の背景に対して表示する場合、拡張現実表示の方がよりリアリティがあり効果的であると考えられる。近年は、VR ゴーグルに備え付けられているカメラによるビデオパススルーの解像度が良くなり、大きな違和感なく VR ゴーグル越しから現実空間のカメラ映像を観察することが出来る。また現実空間をカメラ越しに確認できると周囲のものと衝突することなく安全に教材を扱うことが出来る。2 点目は、照射条件や防護板の位置が限定されている点である。1 回のモンテカルロシミュレーションで数時間を要することから、リアルタイムに照射条件を変えながら VR 上に方向ベクトルなどを表示させることは現実的ではない。この点に関しては、照射条件を変えたものの 3 次元線量分布や方向ベクトルデータを取得しておき、都度目的のデータをインポートして表示することで解決することができる。3 点目は、医療従事者等の使用による本教材の客観的な評価が行えていない点である。本教材は、防護板の有無や複数の線量分布、ベクトル表示方法から散乱線の進行方向や適切な防護板の配置場所を理解できるよう設計したものであるが、理解度の確認のために確認テストを実施したり、目的達成のためのシナリオが適切だったか、使い勝手などのアンケートから教材の質を上げて

いく必要がある。

E. 結 語

モンテカルロシミュレーションにより算出した散乱線の方向ベクトルや周辺線量当量の分布を VR ゴーグルを用いて VR 空間に表示し、任意の方向から確認できた。また、方向ベクトル分布と線量分布を重ね合わせることで、防護板の放射線防護効果を示すことができた。VR 空間では、透視装置、患者、防護板と使用者の視点の位置関係と紐づけて散乱線の進行方向を把握できるため、教育教材として有用である。

参考文献

- 1) Rehani MM, Ciraj-Bjelac O, Vaňo E, et al. ICRP Publication 117. Radiological protection in fluoroscopically guided procedures performed outside the imaging department. Ann ICRP 2010;40:1–102.
- 2) Cha H, Lee K, Park MS, et al. Shielding effect of radiation dose reduction fiber during the use of C-arm fluoroscopy: a phantom study. J Radiat Res 2020;61:705–711.
- 3) Shoaib A, Rethnam U, Bansal R et al. A comparison of radiation exposure with the conventional versus mini C arm in orthopedic extremity surgery. Foot Ankle Int 2008;29:58–61.
- 4) Mesbahi A, Rouhani A. A study on the radiation dose of the orthopaedic surgeon and staff from a mini C-arm fluoroscopy unit. Radiat Prot Dosimetry 2008;132:98–101.
- 5) Tuohy CJ, Weikert DR, Watson JT, et al. Hand and body radiation exposure with the use of mini C-arm fluoroscopy. J Hand Surg Am 2011;36:632–638.
- 6) Yamada A, Haga Y, Sota M, et al. Eye Lens Radiation Dose to Nurses during Cardiac Interventional Radiology: An Initial Study. Diagnostics (Basel) 2023;13:3003.
- 7) Valentin J. Avoidance of radiation injuries from medical interventional procedures. Ann ICRP. 2000;30:7–67.
- 8) Haga Y, Chida K, Kaga Y, et al. Occupational eye dose in interventional cardiology procedures. Sci Rep 2017;7:569.
- 9) Chida K, Kaga Y, Haga Y, et al. Occupational dose in interventional radiology procedures. AJR Am J Roentgenol 2013;200:138–141.
- 10) Takenaka M, Hosono M, Hayashi S, et al. How should radiation exposure be handled in fluoroscopy-guided endoscopic procedures in the

field of gastroenterology?. Dig Endosc 2022;34:890–900.

- 11) García Balcaza V, Camp A, Badal A, et al. Fast Monte Carlo codes for occupational dosimetry in interventional radiology. Phys Med 2021;85:166–174.
- 12) López PO, Dauer LT, Loose R, et al. ICRP Publication 139: Occupational Radiological Protection in Interventional Procedures Ann ICRP 2018;47:1-118.
- 13) Meisinger QC, Stahl CM, Andre MP, Kinney TB, Newton IG. Radiation protection for the fluoroscopy operator and staff. Am J Roentgenol 2016;207:745–54.
- 14) Santos WS, Belinato W, Perini AP, et al. Occupational exposures during abdominal fluoroscopically guided interventional procedures for different patient sizes - A Monte Carlo approach. Phys Med 2018;45:35–43.
- 15) Hirata Y, Fujibuchi T, Fujita K, et al. Angular dependence of shielding effect of radiation protective eyewear for radiation protection of crystalline lens. Radiol Phys Technol 2019;12:401–408.
- 16) Nishi K, Fujibuchi T, Yoshinaga T. Development and evaluation of the effectiveness of educational material for radiological protection that uses augmented reality and virtual reality to visualize the behavior of scattered radiation, J Radiol Prot 2022;42:011506.
- 17) Nishi K, Fujibuchi T, Yoshinaga T. Development of an application to visualise the spread of scattered radiation in radiography using augmented reality. J Radiol Prot 2020;40:1299–1310.
- 18) Fujibuchi T, Radiation protection education using virtual reality by visualization of scatter distribution in radiological examination, J Radiol Prot 2021;41:S317.
- 19) Haowen J, Vimalaevan S, Myint Kyaw B, et al. Virtual reality in medical students' education: a scoping review protocol. BMJ Open 2021;8:e34860.
- 20) Tudor Car L, Kyaw BM, Teo A, et al. Outcomes, Measurement Instruments, and Their Validity Evidence in Randomized Controlled Trials on Virtual, Augmented, and Mixed Reality in Undergraduate Medical Education: Systematic

Mapping Review. JMIR Serious Games 2022;10:e29594.

- 21) Sato T, Iwamoto Y, Hashimoto S, et al. Recent improvements of the particle and heavy ion transport code system - PHITS version 3.33, J. Nucl. Sci. Technol 2024;61:127-135.
- 22) Hizukuri K, Fujibuchi T, Arakawa H, Directional Vector Visualization of Scattered Rays in Mobile C-arm Fluoroscopy, Radiol Phys Technol 2024;17:288-296.
- 23) Hizukuri K, Fujibuchi T, Han D, et al. Directional vector-based quick evaluation method for protective plate effects in X-ray fluoroscopy (DQPEX). Radiol Phys Technol 2024;18:196-208.
- 24) Kim CH, Yeom YS, Petoussi-Henss N, et al. ICRP Publication 145: Adult Mesh-Type Reference Computational Phantoms. Ann ICRP. 2020;49:13-201.

F. 健康危険情報

なし

G. 研究発表

1. 論文発表

なし

2. 学会発表

1. 檜作 響子, 藤淵 俊王, 荒川 弘之, Han Donghee. Virtual reality 技術を利用した X 線透視時の散乱線の方向ベクトルの可視化. 第 1 回日本放射線医療技術学術大会 (JCRTM 2024), 沖縄, 2024 年 10 月 31 日–11 月 3 日.

H. 知的財産権の出願・登録状況

(予定を含む。)

1. 特許取得

なし

2. 実用新案登録

なし

3. その他

なし

労災疾病臨床研究事業費補助金
総合（令和4年度～令和6年度）分担研究報告書
デジタルトランスフォーメーションを活用した医療従事者の被ばく低減プ
ログラムの開発と有効性の検証（220201）

AR 技術による散乱線の可視化を利用した血管造影時の放射線防護教材の有効性の評価

研究分担者 藤淵 俊王 九州大学大学院医学研究院保健学部門医用量子線科学分野 教授

研究要旨

医療現場では、放射線業務従事者の被ばくは問題であり、放射線防護の知識を持つことは重要である。本研究では、**Augmented Reality (AR)** 技術を用いた散乱線可視化アプリケーションによる放射線防護教材を作成し、その有効性を評価した。教材の評価には、○×問題、ARCS モデルをもとにしたアンケート、自由記載を用いた。○×問題の正答率は C アームの角度変化による散乱線分布の変化の問題は 65.5%、72.4%となり、その他の問題は 100%となった。C アームの角度変化は血管造影検査特有の変化であり、他に比べて理解が難しいことがわかった。ARCS モデル教材の学習意欲向上度の評価では、平均点は **Attention** が 4.15、**Relevance** が 3.91、**Confidence** が 3.93、**Satisfaction** が 4.28 だった今回の教材はモチベーションの向上に有効である。自由記載にはアプリケーションの操作性の改善点が挙げられた。特にアプリケーションの操作が難しいことがわかった。本教材はモチベーションの向上に有効であるが、今後はシナリオやアプリケーションの改善が必要である。

研究協力者

野口 昂生

九州大学大学院医学系学府保健学専攻医用量子線科学分野

A. 研究目的

近年、血管造影の需要が増加しており、技術の難易度が高く手技が煩雑なため、長時間の透視や頻回する確認撮影により被曝線量の増大が懸念される。これは、放射線業務従事者の電離放射線による確定的影響や確率的影響の発生確率を高める危険性がある。また、術者における主な被ばく源は患者からの散乱線であるため、放射線防護において散乱線の挙動の理解が必要である。しかし、散乱線は目に見えないため、散乱線挙動の理解を行うことが難しい。血管造影検査において、医師、看護師、臨床工学技士、診療放射線技師といった様々な職種が従事しているが、職種によって放射線についての基礎知識には差があるため、診療放射線技師が中心となって放射線防護教育を行うべきである。しかし、治療などの時間で放射線防護教育に十分な時間を取ることが難しく、放射線防護について理解が不十分である従事者も多い。

ここで、WebVR とは、ウェブブラウザ上で VR(Virtual Reality)体験を行うことができる技術である。WebVR 技術は、地学教材の開発、疑似津波訓練システムへの開発の他、オンラインイベントにて利用されている。WebVR 技術は、仮想空間を利用するための端末と場所を選ばずに利用できる上に、多局面を再現することができ、現実での訓練では用意しなければならない時間や空間などの制限を無視することができる。放射線診療が普及した医療現場において放射線業務従事者の被ばくはがんのリスクや放射線障害の発生につながるため大きな問題である[1, 2]。そのため放射線防護の知識を持つことは重要と言える。しかし多くの先行研究より、医療従事者間においても放射線に対する知識の差があることがわかる[3, 4]。昨今広がるチーム医療において診療放射線技師は放射線分野に関する専門家として他の放射線業務従事者に

対して正しい知識と防護の必要性を伝えることが大切である。しかし、ICRP Publication 117では診療放射線技師においても、放射線防護についての技術、知識、認識に偏りがあることが示唆されている [5]。そのため放射線医療に従事する者は放射線防護の訓練が必要である。

医療従事者の被ばくが問題となる中で被ばく量を低減するためには、散乱線の挙動を理解することが重要と言える[6]。しかし、大きな問題点として散乱線は視界で捉えることができず、挙動をイメージすることは容易ではない。また、放射線は三次元に拡散することから、二次元分布では散乱線の広がりを認識、理解するのに限界がある。そのため、現実世界にデジタル情報を付加することで実際の大きさをよりリアルに体感することができ、また表示デバイスを動かすことで多角的に観察することのできる拡張現実(Augmented Reality: AR)技術を用いて、散乱線を可視化することで目に見えないものをイメージしやすくなり、放射線防護の重要性を認識しやすくなると考えられる[7, 8]。

先行研究において、特に被ばく量の多い C アームを用いた心臓カテーテルにおける血管造影時の散乱線分布についての教育は重要であり[9]、AR 技術を用いた散乱線の可視化が検討されている[8, 9]。しかし、Lima らの研究[10]では特別なヘッドセットを使用しており、演習に対して多くのコストがかかることが考えられる。また、Takata らの研究[11]では実測結果をもとに散乱線分布を可視化するアプリケーションの作成し、評価している。しかし放射線の防護教材を作成しておらず、アプリケーションの活用として不十分であると考えられる。

上記の背景をもとに今回の研究では、AR 技術を用いて C アームを使用した血管造影時の散乱線の分布を三次元に可視化するアプリケーションを作成した。アプリケーションは iPad によって使用することを想定した。また、作成したアプリケーションをもとに、散乱線分布についての理解を深め、放射線の防護方法についての知識を高めるシナリオを作成した。作成したシナリオをもとに診療放射線技師を目指す学生に向けて、知識を高める防護教材を作成し、有効性を検討した。

本研究では、WebVR を用いて散乱線分布を三次元的に可視化し、散乱線の挙動の理解および有効な放射線防護についての教材を作成すること

で、PCI (Percutaneous Coronary Intervention; 経皮的冠動脈インターベンション) に携わる従事者の散乱線の挙動および防護についての教材の作成を目的とした。

B. 研究方法

B-1. AR 技術を用いたアプリケーションの作成

B-1-1. 使用した血管造影室の情報

今回の研究では Fujibuchi らの研究[12]を参考に、Sato らの研究[13]によって作成された心臓の血管造影時の散乱線分布のボリュームデータを使用した。ボリュームデータは PHITS コードによるシミュレーションで作成された。今回使用したシミュレーション結果と実際に測定した値の間には、平均 20% の差異が見られた。この差異は、防護板がある場合とない場合の両方で、16 箇所のデータポイントを基に計算されたものである。X 線スペクトルには、Tucker の計算式計算式 Version 4 (X-Tucker-4)[14]を使用し、フォトンと電子のカットオフエネルギーは 10keV とした。透視条件は放射線源を 1 辺 0.7mm の正方形とし、3.4mmAl の固有濾過と 0.9mm 厚の銅フィルタを考慮することで再現した。シミュレーションされた血管造影検査室の床面積は 300×300 cm² で、床から天井までの高さは 230 cm とした。検査室内では X 線装置とファントムを使用してシミュレーションした。室内は 80% の窒素と 20% の酸素を主成分とする密度 0.001293 g/cm³ の空気を満たされた。X 線管は厚さ 5mm の鉄製の箱(密度 7.874 g/cm³)内にあり、内部は真空である。検査台は炭素(密度 1.6 g/cm³)で構成され、画像取得部の背後にはアルミニウム板(密度 2.7 g/cm³)にてフラットパネル検出器を再現した。画像受像器までの距離は 105 cm、線源アイソセンタ間の距離は 70 cm、床から検査台までの距離は 83 cm、照射野は 20 × 20 cm² に設定された。患者ファントムは ICRP 110 の男性ボクセルファントムを使用した [15]。照射した X 線フォtons のヒストリー数は 1×10¹⁰ と設定した。フォtons のエネルギーは、使用される管電圧に応じて 1 keV から最大エネルギーまでの範囲で、X-tucker ソフトウェアを用いて 0.5 keV のビンサイズで決定され、相対強度として表された。部屋全体のフォトンフルエンスは、2 cm 各辺の立方体の 3D 分布として出力され、合計 150 × 150 × 115 ボクセルで表された。

散乱線分布のデータは C アームの角度別に PA(Posterior-Anterior), LAO(Left Anterior Oblique)60°, RAO(Right Anterior Oblique)30°, Cranial30°, Caudal25°の 5 種類、防護板の有無で 2 種類の計 10 種類を使用した。天井から吊り下げられた防護板は 0.5mmPb の鉛ガラスとし、ベッド下に設置された防護カーテンは 0.5mmPb の遮蔽能力を持つ鉛含有シートで構成された。ともに厚さは 0.5mm である。

B-1-2. Unity への取り込みおよびアプリケーションの作成

B-1-1 で述べた 10 種類の散乱線分布のボリュームデータを、ゲーム開発エンジンである Unity ver.2022.2.181 に取り込んだ。Nishi らの研究[16]によって作成されたアプリケーションをもとに、C アーム装置やそれに伴う散乱線分布のボリュームデータを配置し、アプリケーションを作成した。基本的にはそれぞれのアーム角度における装置の 3D オブジェクトを使用した。一部のオブジェクト作成時に歪な凹凸が見られたため 3DCG(Three Dimensions Computer Graphics)モデリングソフトである Blender ver.3.6 により平滑化した他の角度の 3D オブジェクトを使用した。他の角度のオブジェクトを Unity 上でアーム角度に合うように傾けた。術者の 3D オブジェクトは散乱線分布では使用していない桃色に色付けを行い、目立たせた。また、実際の装置や防護板の色彩をもとに寝台オブジェクトを黒、天吊り防護板オブジェクトを透明度の高い茶色、足元の防護カーテンオブジェクトを紺色にした。

B-1-3.AR アプリケーションの機能

今回作成したアプリケーションの表示端末として iPad Pro(11-inch, 4th generation) iOS16.0 を使用した。メニュー画面で C アームの角度 変更や防護板の有無の変更、二次元断面の変更、カラースケールの変更を行う。二次元断面はアキシャル方向、サジタル方向、コロナル方向に動かすことが可能で、3 方向から任意の断面を選択し散乱線分布を確認することができる。

今回のアプリケーションは起動時に仰臥位である患者の胸部から起動する。このことにより、実際にベッドなどを用いてシミュレーションする際には、患者の胸部にあたる場所から起動す

ることで、より位置合わせを簡易化することができる。

Position ボタンを押しながら iPad 本体を動かすことで C アームや患者、術者のオブジェクトを移動させることができる。**Rot-Right, Rot-Left** を押している間は C アームや患者、術者のオブジェクトが回転する。**Scale** バーの変更により C アームや患者、術者のオブジェクトのサイズを変更することができる。

B-2. 放射線防護教材シナリオ

今回は 5 種類の C アームの角度を用意したことを考え、放射線防護の三原則をもとに、4 つのシナリオを作成した。また、それぞれのシナリオにおいて理解度を測るための○×問題を作成した。作成した問題は結果にて、正答率とともに示す。実際の演習では、シナリオに沿って演習を行う前に、今回の演習を行う上での背景および今回のアプリケーションで対象とした心臓の血管造影検査の概要、アプリケーションの操作方法を説明した。演習中は 2 台のモニタを使用した。モニタには、自分が操作する iPad の画面と演習テキストを表示した。演習テキストには目的、演習手順、観察ポイントがある。観察ポイントは演習後の○×問題に対応して、各シナリオにおいて特に注意して欲しい点を示した。Table I に実際の演習の流れを示す。

Table I 実際の演習の流れ

実習の流れ
1. 演習の背景、血管造影検査の概要説明
2. アプリケーションの操作説明
3. シナリオに沿った演習
3-1. Cアームの角度変化による散乱線分布の変化
3-2. 防護板使用による散乱線分布の変化
3-3. 防護具(ゴーグル・エプロン)使用による被ばく量の変化
3-4. 距離による被ばく量の変化
4. true or fouls問題の回答

各シナリオの目的、演習手順、観察ポイントを Table II に示す。C アームの角度変化による散乱線分布の変化、防護板使用による散乱線分布の変化の演習は、教室を移動し、ライフサイズで演習した。各自に配布した iPad を用いて、演習者自身で散乱線分布の変化を確認した。重要な点においてはモニタの画面を使って説明を行った。一方で防護具(ゴーグル、エプロン)使用

による被ばく量の変化、アイソセンタと術者間の距離による被ばく量の変化については縮小サイズで行った。説明に使用した部屋に戻り、卓上で演習した。今回の演習では、防護ゴーグル

を装着した際の透過率を 50%、防護エプロンを着用した際の透過率を 10%とした[17-21]。

Table II 演習シナリオの目的、演習手順、観察ポイント

シナリオの目的、手順、観察ポイント	
Cアームの角度変化による散乱線分布の変化	
目的	複数のCアーム角度における散乱線分布を確認することで、それぞれの特徴を捉える。
演習手順	1. iPadを手に持ち、PA方向、防護板なし(アプリケーション開始時)の散乱線分布を部屋の中を動きながら確認する 2. LAO60° 防護板なし、RAO30° 防護板なしについて好きな断面で同様に分布を確認する (迷った時は頭尾方向に断面を変更することを推奨) 3. Cau25° 防護板なし、Cra30° 防護板なしについて好きな断面で同様に分布を確認する (迷った時は左右方向に断面を変更することを推奨)
観察ポイント	血管造影検査での術者の被ばくには頭と足元でどのような差があるか Cアームの角度を術者側に傾けると術者に対する被ばく量はどのように変化するか
防護板使用による散乱線分布の変化	
目的	防護板や防護カーテンを使用した際の散乱線分布を確認することで、有用性を確認する。
演習手順	1. iPadを手に持ち、好きなCアームの角度、防護板なしの散乱線分布を部屋の中を動きながら確認する 2. 同じCアーム角度の防護板ありに変更して同様に散乱線分布を確認する 3. 他の角度でも同様に防護板の有無による散乱線分布の変化を確認する
観察ポイント	散乱線の防護において防護板により被ばく量はどのくらい低減しているか 足元の防護カーテンにより被ばく量はどのくらい低減しているか
防護具(ゴーグル、エプロン)使用による被ばく量の変化について	
目的	防護ゴーグルや防護エプロンのような防護具を使用した際の散乱線による被ばく量の変化を確認することで、有用性を確かめる。
演習手順	1. Scaleを変更して、3Dモデルが机の上に乗るように移動させる 2. goggle, protectorの数字を0.5, 0.1に変更する(今回はゴーグルの透過率を50%、エプロンの透過率を10%とする) 3. 術者の被ばく量が変化したのを確認する
観察ポイント	防護メガネをつけることで被ばく量がどれくらい低減されているか 防護エプロンをつけることで被ばく量がどれくらい低減されているか
アイソセンターと術者間の距離による被ばく量の変化	
目的	術者の移動による被ばく量の変化を確認することで、照射中心から離れることの有用性を確かめる。
演習手順	1. 好きな方向に術者を移動して、被ばく量の変化を確認する 2. 左右方向に動かして、被ばく量の変化を確認する 3. 頭尾方向に動かして、被ばく量の変化を確認する
観察ポイント	距離を二倍にすると被ばく量はどのように減少するか

B-3.教材の評価

B-3-1. 対象者

今回は診療放射線技師養成校に所属する 3 年生、29 名に実際に作成したアプリケーションを用いて、シナリオに沿って演習を行った。演習一回あたり 7~8 名の学生を対象として、計 4 回行った。各回では作成したアプリケーションをダウンロードした iPad を人数分用意し、演習開始前に貸し出した。

B-3-2. ARCS モデルを用いた教材の評価

ARCS モデルとは、学習意欲について注意(Attention)、関連性(Relevance)、自信(Confidence)、満足度(Satisfaction)の 4 つの要素で評価するものである。各質問に対して 1 か

ら 5 の 5 段階にて評価を行う[22]。医療以外にも多くの分野において、教材の動機づけ評価として用いられている[23-27]。今回の研究では Nishi らの研究[16]を参考に質問項目を Attention12 問、Relevance9 問、Confidence9 問、Satisfaction6 問とし、各問の平均値をもとに評価する。また、それぞれの項目の評価を比較するために、t 検定:分散が等しくないと仮定した 2 標本による Welch の t 検定を行い、有意差を確認した。P 値が 0.05 以下で有意差ありと判断した。

B-3-3.自由記載による教材の評価

今回の演習において自由記載を実施した。自由記載については疑問に思ったことや良かったこ

と、難しかったことなど、思ったことを自由に書いて良い旨を口頭で伝えた。また、テキストマイニングを KH coder を用いることで、自由記載を解析した。

C. 結果

C-1. 演習中のアプリケーション

C アームの角度変化による散乱線分布の変化を確認するシナリオでは Fig.1 のように変化を確認した。

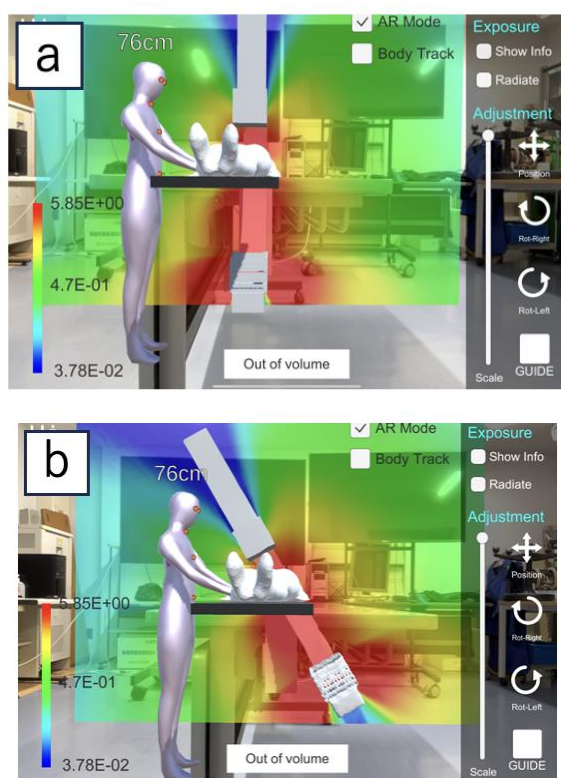


Fig. 1 アプリケーション使用時の分布変化の確認画像。PA 方向(a)と RAO30°方向(b)を比較すると C アームの角度を変えることで散乱線分布が変化していることがわかる。

天吊り防護板および足元の防護カーテンの使用による散乱線分布の変化を確認するシナリオでは Fig. 2 のように防護板による散乱線のカッ

トを確認できた。

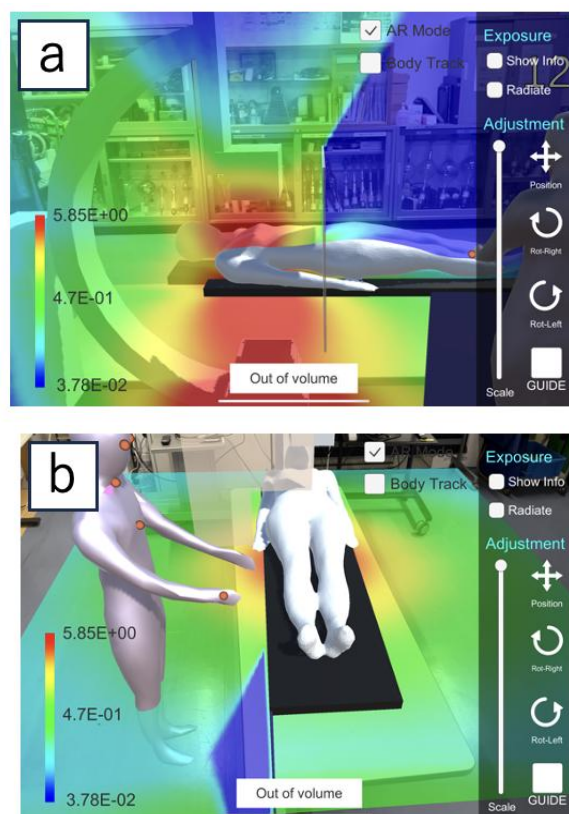


Fig. 2 アプリケーション使用時の防護板による分布変化の確認画像。天吊り防護板による散乱線の画像(c)と足元の防護カーテンによる散乱線の画像(d)から防護板の後ろで散乱線がカットされていることがわかる。

縮小サイズで行った防護具使用による被ばく量の変化およびアイソセンタと術者の距離による被ばく量の変化を確認するシナリオでは、Fig. 3 のように変化を確認した。術者オブジェクトの立ち位置における各点(水晶体、甲状腺、胸部、腹部、手)の被ばく量は画面左下に示される。アイソセンタからの距離は術者オブジェクトの頭上に表示される。

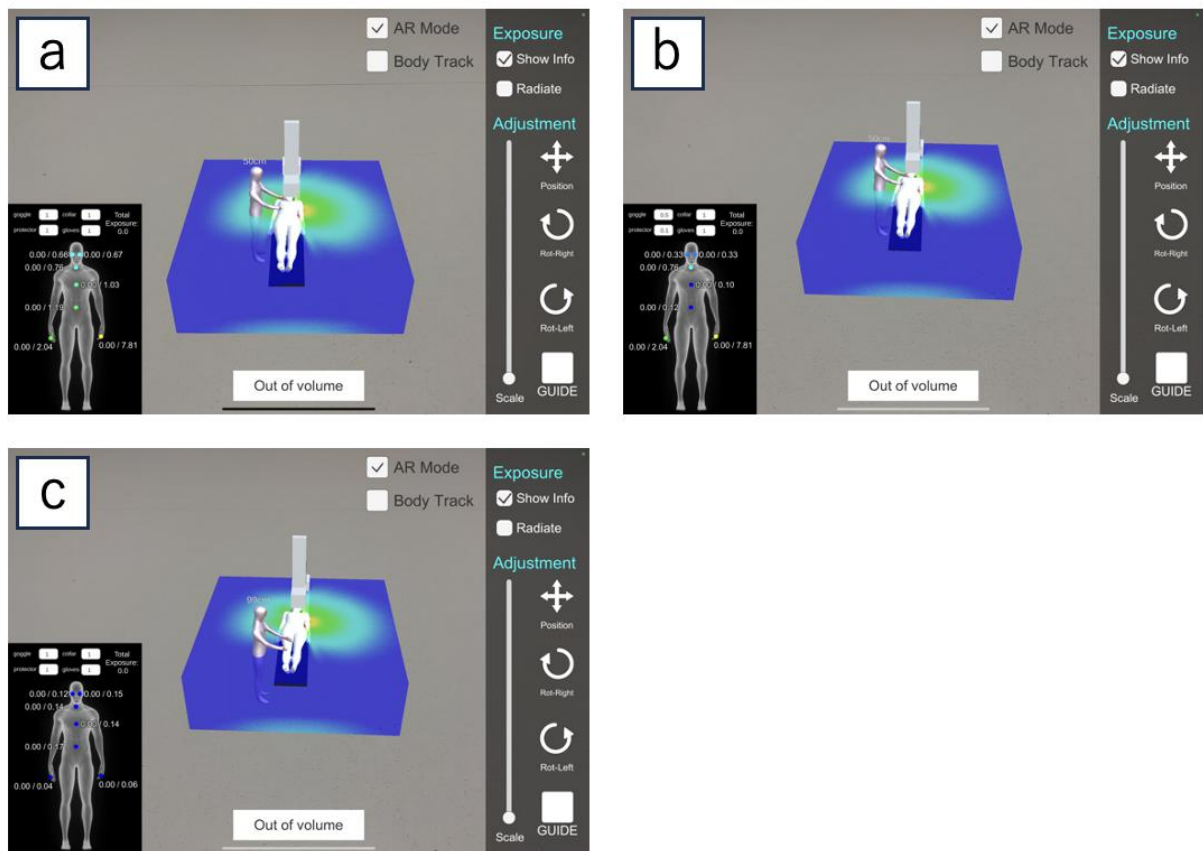


Fig.3 アプリケーション使用時の卓上演習の画面。ゴーグル、エプロン無し(e)と有り(f)を比較すると、胸部、水晶体の被ばく量がそれぞれ 0.1 倍、0.5 倍になることが確認できる。アイソセンタからの距離が 50cm(e)と 99cm(g)を比較すると全ての測定点で被ばく量が減少していることがわかる。

C-2. ○×問題の正答率

Table IIIに各問と正答率を示す。これらの結果より、C アームの角度変化による散乱線分布の

変化についての問題の正答率が他の問題に比べて低く、他の問題は正答率が 100%となった。

Table III True or false 問題と正答率

問題	正誤	正答率
Cアームの角度変化による散乱線分布の変化		
血管造影検査では頭部に比べて足元での被ばく線量が多い	○	65.5%
Cアームの角度を術者側に傾けると術者に対する被ばく線量は増加する	○	72.4%
防護板使用による散乱線分布の変化		
散乱線の防護において防護板を用いる必要はない	×	100%
足元の防護カーテンは被ばく低減において効果がない	×	100%
防護具(ゴーグル、エプロン)使用による被ばく量の変化		
防護ゴーグルをつけることで被ばく量を大きく低減することができる	○	100%
防護エプロンでは被ばく量の低減は期待できない	×	100%
アイソセンタと術者間の距離による被ばく量の変化		
距離を2倍にすると被ばく量は2分の1になる	×	100%

C-3. 教材の評価

C-3-1. ARCS モデルによる教材の評価

Fig. 4, Table IVに注意(Attention)、関連性(Relevance)、自信(C Confidence)、満足度(Satisfaction)の要素ごとの平均値と各問の内容を示す。ARCS モデルにおいては各問に1から5の5段階で評価を行う。否定的な質問に対し

ては1を5、2を4のように修正したのちに、平均値を算出した。Attention、Satisfactionの値は4を上回り、Relevance、Confidenceの値も4に近い値となった。また、t検定よりSatisfactionはRelevance、Confidenceと比較して有意差があり、AttentionはRelevanceと比較して有意差があることが確認できた。

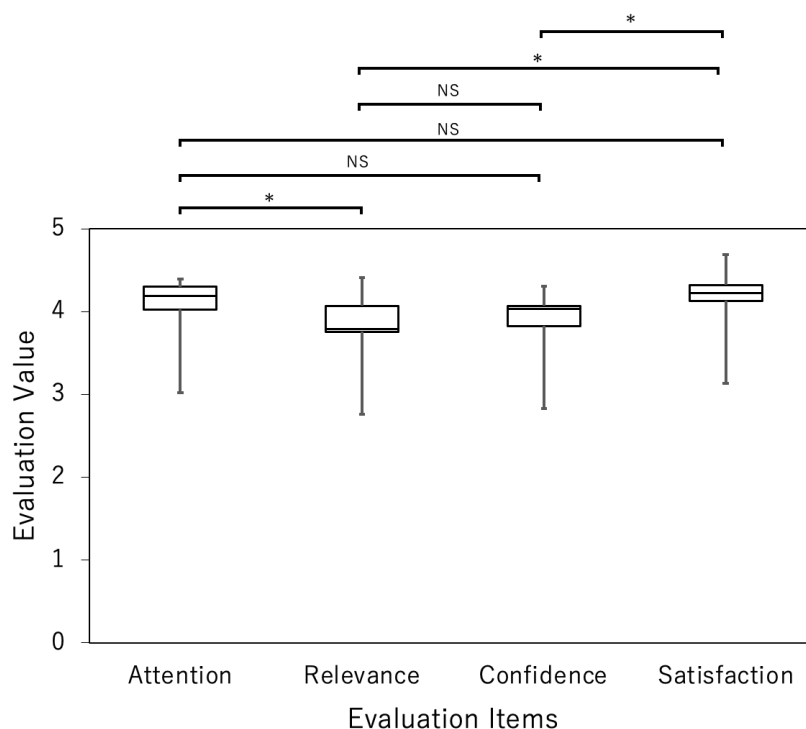


Fig. 4 ARCS モデルに基づいたアンケート結果。各項目ごとに平均値と標準偏差を示す。平均点と標準偏差は Attention が 4.15 ± 0.22 、Relevance が 3.91 ± 0.27 、Confidence が 3.93 ± 0.29 、Satisfaction が 4.28 ± 0.22 となった。また項目ごとに有意差検定を行い、比較した。* $P < 0.05$ NS not significant

Table IV アンケート内容と各問の平均点

Content of the questionnaire	Evaluate Value
A1. この教育コンテンツを最初に見た時、私は簡単に操作できる印象を受けた。	3.69
A2. この教育コンテンツの冒頭に私の注意を引く興味深い内容があった。	4.14
A3. この教育コンテンツは、私が考えていたよりも理解しづらいものだった。	4.00
A4. この教育コンテンツの指示スライドを読んで、私はこの講義で何を学ぶべきか理解した。	4.24
A5. この教育コンテンツで実習を終えた時、満足のいく達成感が得られた。	4.34
A6. この教育コンテンツにより、すでに知っていた内容とのつながりが持てた。	4.38
A7. この教育コンテンツは、情報量が多すぎて、重要なポイントを拾い上げて覚えることが難しかった。	4.03
A8. この教育コンテンツは目を引くものだった。	4.14
A9. この教育コンテンツが誰にとって重要なのかを示す写真または事例があった。	3.83
A10. この教育コンテンツを目的通りに終えることは、私にとって重要と感じた。	4.29
A11. この教育システムの内容は、私に放射線防護の注意を引きつける助けになった。	4.39
A12. この教育コンテンツはとても抽象的で、私の注意を引きつけるのは難しかった。	4.28
R1. この教育コンテンツを使用して、放射線防護方法の内容を学ぶことができたと思えた。	3.97
R2. 私はこの教育コンテンツをとても楽しめたので、放射線防護方法についてもっと知りたいと思った。	3.76
R3. この教育コンテンツは退屈で、魅力的ではなかった。	4.41
R4. この教育コンテンツの内容は、私の興味に関係していた。	3.61
R5. このシステムの情報の提示方法は、私の注意を引きつけるのを助けた。	3.79
R6. この教育コンテンツで、医療スタッフがどのように放射線防護の知識を活用するかの説明や例があった。	4.07
R7. この教育コンテンツの演習は難しかった。	4.14
R8. この教育コンテンツでは、私の好奇心を刺激したことがあった。	3.69
R9. 私はこの教育コンテンツを本当に楽しんでいて。	3.79
C1. この教育コンテンツの内容の繰り返しは、時々退屈になった。	3.83
C2. この教育コンテンツの内容とスタイルは、その内容を知る価値があるという印象を伝えた。	4.07
C3. この教育コンテンツを通じて驚くべきことや、予想外のことを学んだ。	3.28
C4. 教育コンテンツでトレーニングした後、しばらくの間、私は放射線防護対策を実施できるだろうと思った。	4.03
C5. 私が既に大部分を知っていたため、教育コンテンツは私のニーズに関係なかった。	3.83
C6. 講習中の質疑は、教育効果を向上させるよう感じる手助けをしていた。	4.03
C7. この教育コンテンツにおける実習、図などの様々な資料が私の注意を引くのに役立った。	3.86
C8. この教育コンテンツの形式が退屈だった。	4.14
C9. この教育コンテンツの内容は、これまで自分が見たこと、したこと、あるいは考えたことに関連付けることができた。	4.31
S1. この教育コンテンツには、非常に多くの説明があり、いらいらした。	4.34
S2. この教育コンテンツを上手く完了できたことが良かったと感じた。	4.21
S3. この教育コンテンツの内容は私にとって役に立つと考えられる。	4.25
S4. この講義で、私はこの教育コンテンツの大部分を理解できなかった。	4.69
S5. この教育コンテンツの構成は、放射線防護対策の内容を学習できたという自信をつけるのに役立った。	4.11
S6. このように設計された教育コンテンツに取り組むのは楽しいことだった。	4.07

C-3-2. 自由記載による教材の評価

今回の自由記載で複数回登場した単語をテキストマイニングで解析し、得られた共起ネットワーク図を Fig. 5 に示す。アプリケーション内に登場するオブジェクトや、アプリケーション

の操作に関する単語が多く見られた。良いという単語も記載されたことがわかる。また自由記載には、Table V に示すようなアプリケーションの改善点が挙げられた。

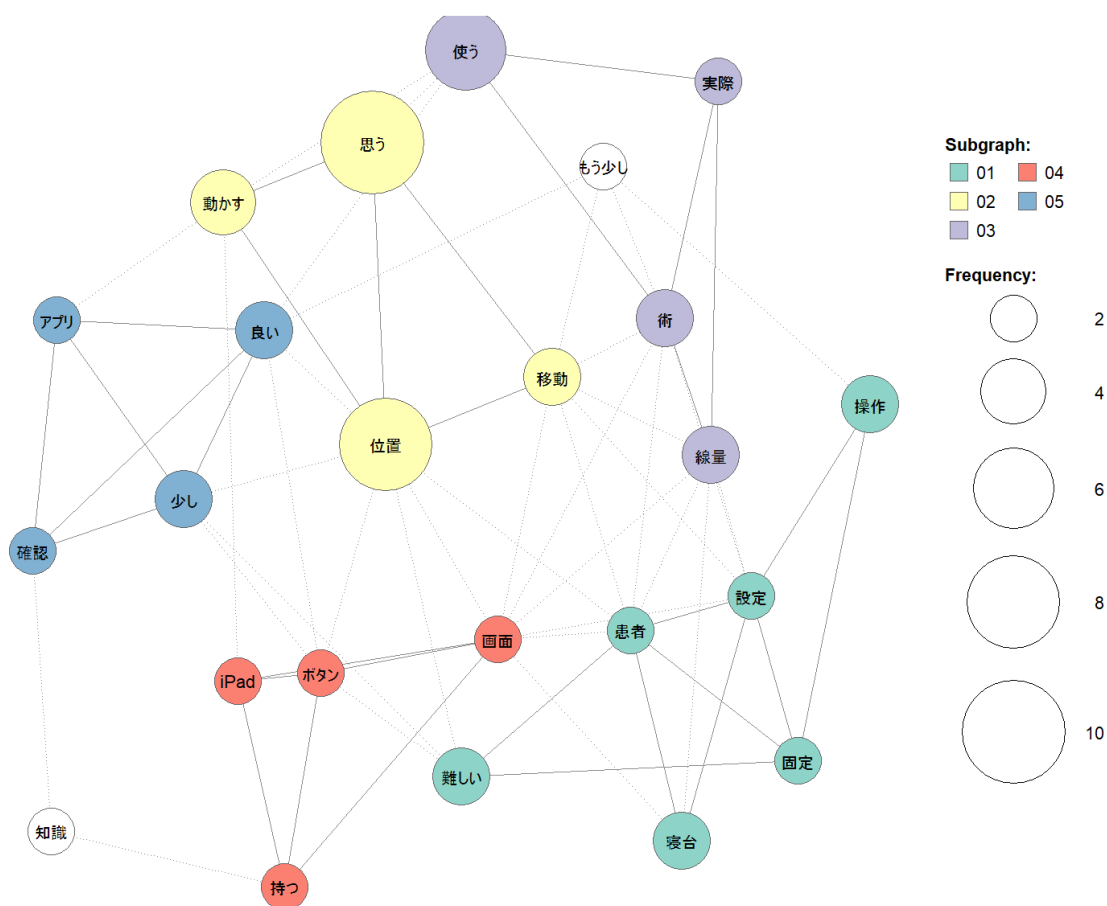


Fig. 5 自由記載より得られた共起ネットワーク図。各単語の出現数、つながりが視覚的にわかる。

Table V 自由記載で挙げられた改善点一覧

改善点
Bed moves too slowly
Difficult position adjustment
Simplify 3D model position movement
Complicated position alignment
Fix the close (X) button in the menu
Allow intuitive cross-section changes
Add a pause function
Enable setting of operator height and shield position
Adjust C-arm angle incrementally
Positions misalign when reopening the app

D. 考察

True or false quiz の結果より C アームの角度変化による散乱線分布の変化についての正答率が他に比べて低いことがわかった。一方でその他の問題については正答率が 100%となった。この結果より、C アームの角度による散乱線分布の変化は C アームを使った血管造影検査におけ

る特有の現象であり、今後シナリオを改善する際により詳細にすることが望ましいと考える。一方で、その他の問題については C アーム特有のものではなく、学生の放射線に対する知識がある程度あることを示していると考えられる。今回の演習は対象者を診療放射線技養成校の学生を対象としたため、基本的な放射線に関する

知識を持っていたことが正答率に表れたと考える。今回の結果をもとに、今後は診療放射線技師を目指す学生のように放射線についての学習を行なっている学生については問題の難易度を調節することが望ましい。

ARCS モデルのアンケート結果より、他と比べて **Satisfaction** の値が高く、**Relevance**、**Confidence** の値が低い結果となった。特に **Satisfaction** の 4 番目の項目(この講義で、私はこの教育コンテンツの大部分を理解できなかった)の評価が最も高く、4.69 であり、**Confidence**3(この教育コンテンツを通じて驚くべきことや、予想外のことを学んだ)の評価が最も低く、3.28 である。また、t 検定によって **Satisfaction** は **Relevance**、**Confidence** と比較して値が高いことがわかった。これらの原因として、演習内に既知の知識が含まれていたことが原因であると考ええる。シナリオ内の情報について、すでに知っている情報が入っていた場合に、その評価は低くなると考える。今回の結果より演習について理解は進んでいるため今後は演習内容の調節を行い、より多くの知識を提供することで、成長できたという自信を提供することができるのではないかと考えている。平均値を見ると **Attention**、**Satisfaction** の値は 4 を上回り、**Relevance**、**Confidence** の値も 4 に近い値となった。このことより今回の演習シナリオは教材としては良いものであると考える。

自由記載についてアプリケーションの複数の改善点が挙げられたため、テキストマイニングの結果においてアプリケーション内のオブジェクトおよび操作面についての単語が多く挙げられたと考えられる。解析による共起ネットワーク図の結果よりアプリおよび確認と良いが結びついており、アプリケーションをもとに分布の確認ができたことが良い評価に繋がったと考える。また iPad や画面が知識や持つと関連しているため、散乱線分布を画面で確認することで、すでに持っている知識を再確認することができたのではないかと考える。一方でアプリケーションの操作、設定に関する単語は難しいと関連生があり、アプリケーションの操作性の問題が浮き彫りとなった。しかし、今回の対象は 29 名のみであり、さらに自由記載については全ての学生が回答したわけではないため、偏った意見になっている可能性がある。

研究限界と今後の課題について、今回の演習は

学生のみを対象に行ったため、診療放射線技師として実際に働いている人を対象に演習を行い、今回のシナリオが実際に必要な知識を提供できているかなどの意見をもらうことが必要である。また、今後は他の医療従事者を目指す学生に向けた学習教材を作成する際は、より放射線について基礎的なシナリオを作成する必要がある。アプリケーションについては、操作性に改善の余地がある。また、C アームの角度や防護板の位置、照射条件などが固定となっているため、条件の自由度が低く、その点が実際の医療現場と異なる点に留意が必要である。さらには、今回の散乱線分布の表示方法では、散乱線の進む方向までを示すことができていない。今後は、アニメーションや矢印により、放射線の広がり方を示すことが必要となる。

E. 結論

本研究では散乱線を可視化することで散乱線分布や距離、防護具による被ばく量の低下について直感的に理解することができるアプリケーションが作成できた。また作成したアプリケーションをもとに放射線防護教材を作成した。

今回作成したシナリオを用いて実際に演習を行い、教材として評価した。今回の結果からアプリケーションの改善点、シナリオの変更すべき点が明らかになった。特に、○×問題の難易度の設定について、診療放射線技師の養成校に通う学生には多くの問題で正答率が 100% となることがわかったため、今後はより詳細な問題を作成する。また ARCS モデルによる教材の評価より、平均値は 4 に近い値となり、学習意欲の向上についてこの教材は有効であることがわかった。一方で教材によって得ることのできる知識にすでに既知の知識が多く含まれている可能性が示唆された。今後のシナリオ改善においてはより多くの知識を示すことのできるものを作成する。自由記載から、アプリケーションの操作が難しいことがわかった。

参考文献

1. Picano E, Vano E, Domenici L, Bottai M, Thierry-Chef I. Cancer and non-cancer brain and eye effects of chronic low-dose ionizing radiation exposure. *BMC Cancer*. 2012; <https://doi.org/10.1186/1471-2407-12-157>
2. Roguin A, Goldstein J, Bar O, Goldstein, J. A.

- Brain and neck tumors among physicians performing interventional procedures. *Am J Cardiol.* 2013; <https://doi.org/10.1186/1471-2407-12-157>
3. Hayashi S, Takenaka M, Kogure H, et al. A questionnaire survey on radiation protection among 282 medical staff from 26 endoscopy-fluoroscopy departments in Japan. *DEN Open.* 2021; <https://doi.org/10.1002/deo2.5>
 4. Fataftah J, Ttayem R, Al-Dwairy S, et al. Awareness of radiation hazards and knowledge of radioprotective measures among radiologists and non-radiology staff: a cross-sectional survey. *Egyptian Journal of Radiology and Nuclear Medicine.* 2024; <https://doi.org/10.1186/s43055-024-01300-4>
 5. ICRP. Radiological Protection in Fluoroscopically Guided Procedures outside the Imaging Department. ICRP Publication 117. Ann. ICRP. 2020; 40(6): 1-102.
 6. Fujibuchi T, Radiation protection education using virtual reality by visualization of scatter distribution in radiological examination, *J Radiol Prot* 2021;41(4). <https://doi.org/10.1088/1361-6498/ac16b1>.
 7. Dhar P, Rocks T, Samarasinghe RM, Stephenson G, Smith C. Augmented reality in medical education: students' experiences and learning outcomes. *Medical Education Online.* 2021; <https://doi.org/10.1080/10872981.2021.1953953>
 8. Nishi K, Fujibuchi T, Yoshinaga T. Development and evaluation of the effectiveness of educational material for radiological protection that uses augmented reality and virtual reality to visualize the behavior of scattered radiation, *J Radiol Prot* 2022;42(1) <https://doi.org/10.1088/1361-6498/ac3e0a>.
 9. Kato M, Chida K, Munehisa M, et al. Non-lead protective aprons for the protection of interventional radiology physicians from radiation exposure in clinical settings. *Diagnostics (Basel).* 2021; <https://doi.org/10.3390/diagnostics11091613>
 10. Lima TV, Simões RFP, Heinrich M, Kreienbühl T, Wetzel R, Roos JE. Usefulness of augmented reality in radiological protection education and training for interventional radiologists. *Br J Radiol.* 2023; <https://doi.org/10.1259/bjr.20221075>
 11. Matsuzaki S, Moritake T, Morota K, et al. Development and assessment of an educational application for the proper use of ceiling-suspended radiation shielding screens in angiography rooms using augmented reality technology. *Eur J Radiol.* 2021; <https://doi.org/10.1016/j.ejrad.2021.109925>
 12. Fujibuchi T, Nakashima M, Arakawa H, Miyazaki H, Anam C. Evaluation of radiation protection effectivity in a cardiac angiography room using visualized scattered radiation distribution. *J Radiol Prot.* 2021; <https://doi.org/10.1088/1361-6498/ad6d75>
 13. Sato N, Fujibuchi T, Toyoda T, et al. Consideration of the protection curtain's shielding ability after identifying the source of scattered radiation in the angiography. *Radiat Prot Dosimetry.* 2017; <https://doi.org/10.1093/rpd/ncw291>
 14. Kato H X-ray-spectrum-2 , (available at: <https://hidekikato1952.wixsite.com/radiotechnology>) (Accessed 17 January 2022)
 15. ICRP. Adult reference computational phantoms. ICRP publication 110. Ann ICRP. 2009; 39(2): 1-164.
 16. Nishi K, Fujibuchi T, Yoshinaga T. Development of an application to visualise the spread of scattered radiation in radiography using augmented reality. *J Radiol Prot.* 2020; <https://doi.org/10.1088/1361-6498/abc14b>
 17. Livingstone RS, Varghese A. A simple quality control tool for assessing integrity of lead equivalent aprons. *Indian J Radiol Imaging.* 2018; https://doi.org/10.4103/ijri.ijri_374_17
 18. König AM, Zoum JV, Fiebach M, Abissi PW, Mahnken AH. Comparison of the radiation protection effect of different radiation protection aprons made of different materials. *Eur J Radiol.* 2023; <https://doi.org/10.1016/j.ejrad.2023.110862>
 19. Endo M, Haga Y, Sota M, et al. Evaluation of novel X-ray protective eyewear in reducing the eye dose to interventional radiology physicians. *Journal of Radiation Research.* 2021; <https://doi.org/10.1093/jrr/rrab014>
 20. Haga Y, Chida K, Kaga Y, Sota M, Meguro T, Zuguchi M. Occupational eye dose in interventional cardiology procedures. *Scientific Reports.* 2017; <https://doi.org/10.1038/s41598-017-00556-3>
 21. Cheon BK, Kim CL, Kim KR, et al. Radiation safety: a focus on lead aprons and thyroid shields in interventional pain management. *Korean J Pain.* 2018; <https://doi.org/10.3344/kjp.2018.31.4.244>
 22. Keller JM. Motivation, Learning, and Technology: Applying the ARCS-V motivation

model. *Participatory Educational Research*. 2016; <http://dx.doi.org/10.17275/per.16.06.3.2>

23. Son D, Kawamura K, Utsumi M, Nakashima M, Suzuki K, Watanabe N. The development and evaluation of the interprofessional education facilitation program for health professionals using the Attention, Relevance, Confidence, and Satisfaction (ARCS) model of instructional design. *Cureus*. 2023; <https://doi.org/10.7759/cureus.37496>
24. Li D. Psychological emotion and behavior analysis in music teaching based on the Attention, Relevance, Confidence, and Satisfaction motivation model. *Front Psychol*. 2022; <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2022.917476>
25. Laurens-Arredondo L. Mobile augmented reality adapted to the ARCS model of motivation: a case study during the COVID-19 pandemic. *Education and Information Technologies*. 2022; <https://doi.org/10.1007/s10639-022-10933-9>
26. Cai X, Li Z, Zhang J, et al. Effects of ARCS model-based motivational teaching strategies in community nursing: a mixed-methods intervention study. *Nurse Educ Today*. 2022; <https://doi.org/10.1016/j.nedt.2022.105583>
27. Maiti M, Priyaadharshini M, Harini S. Design and evaluation of a revised ARCS motivational model for online classes in higher education. *Heliyon*. 2023; <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e22729>

F. 健康危険情報 なし

G. 研究発表

1. 論文発表
 1. Noguchi K, Fujibuchi T, Han D, Effectiveness of radiation protection educational material during angiography using visualization of scattered radiation by augmented reality technique. *Radiological physics and technology*, 2025.
2. 学会発表
 1. Toshioh Fujibuchi, Hiroyuki Arakawa, Creati

on and implementation of educational scenarios aimed at understanding optimization of radiation protection in fluoroscopy using Extended Reality, The 80th annual meeting of the JSRT, Yokohama, April 11-14, 2024.

2. Koki Noguchi, Toshioh Fujibuchi, Hiroyuki Arakawa, Creation of Radiation Protection Educational Material by Visualization of Scattered Rays during Tube Angiography Using AR Technology, The 80th annual meeting of the JSRT, Yokohama, April 11-14, 2024.
3. 12. Koki Noguchi, Toshioh Fujibuchi, Creation of Radiation Protection Educational Material by Visualization of Scattered Rays during Tube Angiography Using AR Technology, The 13th Korea - Japan Joint Summer Workshop in Radiological Sciences and Technology, Busan, Sep. 2-14, 2024.
4. 藤淵俊王, 富澤登志子, Extended reality を利用した放射線診療従事者向け医療放射線防護教育教材の開発と実践, 第 67 回日本放射線影響学会, 北九州, 2024.9.25-28.
5. 野口昂生, 藤淵 俊王, AR 技術を利用したモバイル C アーム透視装置および CT 装置の散乱線可視化による放射線防護アプリケーションの作成. 第 1 回日本放射線医療技術学術大会(JCRTM 2024), 沖縄, 2024 年 10 月 31 日-11 月 3 日.
6. Toshioh Fujibuchi, Donghee Han, Education on optimizing radiation protection in X-ray fluoroscopy-guided procedures using extended reality, PHITS Workshop and Intermediate Course at Japan Atomic Energy Agency in Tokai, Japan 2025, February 18-21, 2025

H. 知的財産権の出願・登録状況 (予定を含む。)

1. 特許取得
なし
2. 実用新案登録
なし
3. その他
なし

労災疾病臨床研究事業費補助金
総合（令和4年度～令和6年度）分担研究報告書
デジタルトランスフォーメーションを活用した医療従事者の被ばく低減プログラム
の開発と有効性の検証（220201）

リアルタイム被ばく警告システムの基本特性評価

研究分担者 藤淵 俊王 九州大学大学院医学研究院保健学部門医用量子線科学分野 教授

研究要旨

近年、X線透視や非血管インターベンショナルラジオロジー（IVR）手技は医療従事者の間で広く利用されている。しかし、これらの手技では、外科医や放射線技師、患者が比較的高い放射線を浴びるリスクがある。この職業的被ばくリスクを考慮し、放射線防護教育のために、深度カメラを用いて術者の位置を監視しながら透視中の放射線被ばくを推定するシステムを開発した。このシステムにより、医療従事者の放射線被ばくを最小限に抑え、散乱線の挙動を把握することが可能になる。

X線室内の散乱線の線量分布は、モンテカルロコードを用いてシミュレーションした。得られたデータは拡張現実（AR）マーカーを使用して可視化され、関節点ごとの線量はボディトラッキングによって推定した。さらに、任意の二次元断面を表示する機能などを追加した。

本システムの精度検証の結果、術者がカメラから遠い場合、位置検出精度に大きな標準偏差が見られた。システムの動作性能は、動作の有無や防護エプロンの着用に関係なく、9.0 fps～11.0 fpsの範囲だった。システムの距離の精度はカメラから遠いほど標準偏差が大きく、関節点ごとの推定線量は、測定された線量率の0.60から1.21倍の範囲内だった。

研究協力者

本井 健太 九州大学大学院医学系学府保健学専攻医用量子線科学分野

A. 研究目的

内視鏡的逆行性胆管膵管造影や経皮経肝胆道ドレナージなどのX線透視検査や非血管系IVR（Interventional Radiology）は医師をはじめとする放射線診療従事者や患者に比較的高い被ばくを生じさせる可能性がある。これはX線透視室で働くには、通常、医療従事者がX線管自体と主な散乱線X線源となる患者の両方の近くに立つ必要があるためである。また、放射線防護の観点において2011年にICRP（International Commission on Radiological Protection）ソウル声明で白内障のしきい線量の変更と水晶体の等価線量限度の引き下げが勧告された。これに伴い、各国で水晶体の等価線量限度の引き下げが法令に取り込まれつつある。以上より今後はさらに放射線診療従事者の被ばく管理、放射線被ばく防護が重要となる。しかし、臨床現場で用

いられる線量計を用いた個人線量管理は全身の被ばくを測定できない、測定結果を得るのに時間がかかるなどの問題がある

また、近年モンテカルロ法によるシミュレーションを用いたX線透視検査や非血管系IVRの術者の被ばく線量推定に関する研究も行われている。先行研究ではモンテカルロ法で計算した三次元散乱線分布とボディトラッキング技術によりリアルタイムでの線量率や累積線量を推定している。しかし、三次元散乱線分布を利用して線量予測をしているが、天井から見た二次元の線量分布しか可視化されていない。そこでAR技術を用いてカメラの撮影する現実空間上に散乱線分布の任意の二次元断面を可視化することで散乱線の広がりにより詳細にわかり、職業被ばくの低減につながると考えた。また、知識や自覚を欠いている

場合人はリスクを過大または過少評価してしまう傾向にあるため、術者の線量率を表示することで術者の放射線被ばくの危険性に対する自覚が強くなり、放射線被ばくの低減に有効であると考えた。そこで、深度カメラを用いたボディトラッキング技術を利用し、散乱線分布を任意の二次元断面を可視化し、リアルタイムで職業被ばくを推定するシステムを作成することでさらに医療従事者の散乱線被ばくの防護につながる。

本研究では、X線透視検査や非血管系IVRにおける放射線防護教育のために、散乱線を可視化し、リアルタイムの術者の動きに対応した関節の線量値を推定するシステムを開発した。開発したシステムのモンテカルロシミュレーション、関節点検出、リアルタイム性能、線量推定の精度を評価した。

B. 研究方法

B-1. システムの作成

散乱線分布のシミュレーションにはモンテカルロコードPHITS (Particle and Heavy Ion Transport code System) を使用した。カメラにはAzure Kinectを使用した。Azure Kinect (型番,Microsoft, America) はTOF(Time of Flight)式の深度センサが搭載されたカメラで、通常のカメラのようにRGB(Red-Green-Blue color model)画像の取得に加え、深度情報の取得や骨格認識を可能にする(Figure 1)。システム開発にはゲーム開発プラットフォームのUnityと画像処理ライブラシシステムの配置図をFig. 3に示す。



Fig.1 深度センサを内蔵するカメラAzure Kinect Azure (Microsoft)

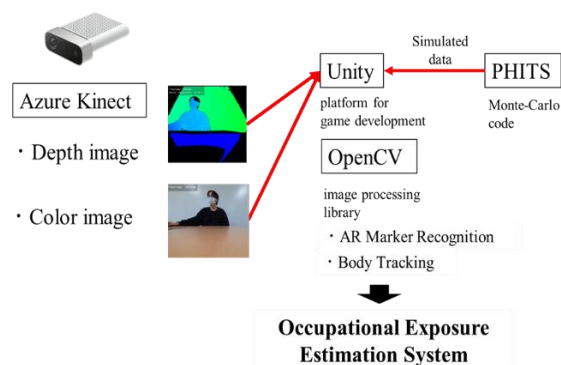


Fig 2. システムの要素と概要

Azure Kinectにより取得したX線室内の情報、PHITSによるシミュレーションデータをUnityに取り込みOpenCVを用いて処理した

Table 1. システムの開発環境

OS	Windows 10 64bit Education 16GB
CPU	Intel Core i9-9980
GPU	GeForce RTX 2080
Software	Unity 2020.3.8.f1
	Azure Kinect Sensor SDK 1.4.1
	Azure Kinect Body Tracking SDK 1.1.0
	OpenCV for Unity

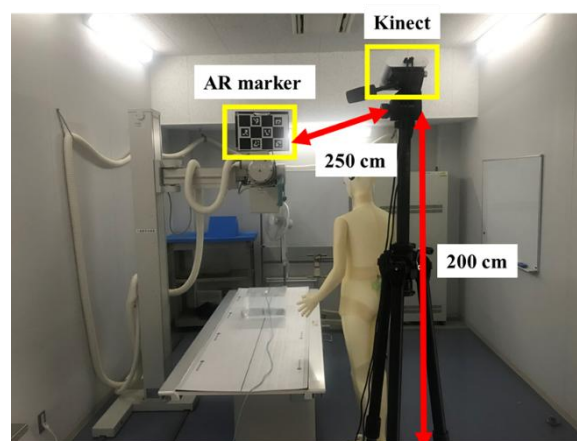


Fig 3. システムを使用するときの機器の配置
カメラの高さは200 cm、カメラとARマーカの距離は250 cm、カメラは下向きに20°

B-1-1 X線透視室内の散乱線分布計算

散乱線の挙動は MC シミュレーションコード PHITS version 3.28 を用いてシミュレーション

ンした。光子は PHITS 内のコードシステム EGS5 (Electron-Gamma Shower version 5)を用いて輸送計算した。EGS5 は PHOTX ライブラリの最新の光子断面積を使用している。

窒素 80%、酸素 20%からなる密度 $0.001293 \text{ g cm}^{-3}$ の空気で満たした X 線検査室に X 線管、X 線源、寝台（床からの高さ 80 cm、長さ 235 cm、幅 85 cm）などから構成される X 線装置を準備した。X 線管は密度 7.874 g cm^{-3} 、厚さ 5 mm の鉄製ボックスで内部は真空である。X 線管の照射側のコリメータは密度 11.34 g cm^{-3} 、厚さ 2 mm の鉛製である。寝台は密度 1.6 g cm^{-3} のカーボン製である。さらに、フラットパネル検出器 (FPD : flat panel detector)を模した密度 2.7 g cm^{-3} のアルミニウム板を撮影部位の後方に配置した。X 線装置は鉄製である。被写体は $30 \times 30 \times 15 \text{ cm}^3$ の水ファントムである。照射条件は管電圧 87 kV、固有ろ過 2.5 mmAl、焦点-検出器間距離 120 cm、照射野サイズ $15 \times 15 \text{ cm}^2$ である。焦点と水ファントム表面の距離は 92.5 cm であった。



診断領域の X 線スペクトル計算ソフトウェアである Tucker's formula Version 4 (X-Tucker-4) を用いて、管電圧 87 kV、固有ろ過 2.5 mmAl の連続エネルギースペクトルを 0.5 keV 間隔で計算した。得られたデータを線源として用いた。MC シミュレーションのヒストリー数は 10^9 とした。カットオフエネルギーは、光子は 10 keV、電子は 100 keV とした。

シミュレーションでは仮定の X 線室内に一边 5 cm の立方体を作り、その立方体を通過する光子数をカウントした。フルエンスから入射表面線量を基準とした個人線量当量への変換は、ICRP 74 の「光子フルエンスから個人線量当量への換算係数」を用いて 1 線源あたりのフ

ルエンスを個人線量当量に変換し、水ファントムの入射表面線量で除すことで算出した。

B.1.2 X 線検査室内の術者のボディトラッキング

Microsoft 社製の Azure Kinect を使用してボディトラッキングを行った。Azure Kinect は 32 個の体の部位を認識しボディトラッキングを行っている。このボディトラッキングした結果をソフトウェア開発プロジェクトのためのソースコード管理サービスである GitHub 上の Microsoft の Azure-Kinect-Samples を参考にゲーム開発プラットフォームである Unity 上に表示した。

2.1.3 散乱線分布の AR マーカーによる表示

Unity の VR 上に X 線装置、ファントム、散乱線分布のボリュームデータを表示した。これらのデータの表示には大きさは縦 24 cm×横 32 cm の AR マーカーを使用した。AR マーカーには様々な種類があるが、本システムでは ArUco マーカーという種類の AR マーカーを採用した。ArUco マーカーとは黒枠と識別子を決定する内側のバイナリマトリクスで構成される合成正方形マーカーである。ArUco マーカーの主な利点として検出が正確で、迅速かつ容易であることが挙げられる。AR マーカーは実際の X 線管の焦点とシミュレーションしたボリュームデータの焦点を一致させやすいように Fig. 4 のように X 線管上部に配置した。その後、AR マーカーの左下を基準として二つの焦点が一致するように座標を調整した。

Fig 4. ArUco マーカーによる散乱線分布の表示

B.1.4 機能の作成

術者の被ばく線量を推定するために Unity の衝突判定の関数を使用した。ボディトラッキングした関節点の位置におけるシミュレーションのボリュームデータの値を表示した。また、任意の二次元断面の線量分布を表示できる機能を作成した。線量分布の表示する断面を選択する機能とカラースケールを調節する機能を作成した。さらに線量分布を滑らかに表示するためにスムージング機能を追加した。

B.2 モンテカルロシミュレーションの精度評価

PHITS により得られた散乱線分布のシミュレーションデータについて可視化ソフトウェア ParaView を用いて入射表面線量 1 mGy あたりの個人線量当量を取得した。測定位置を Fig.5 に示す。

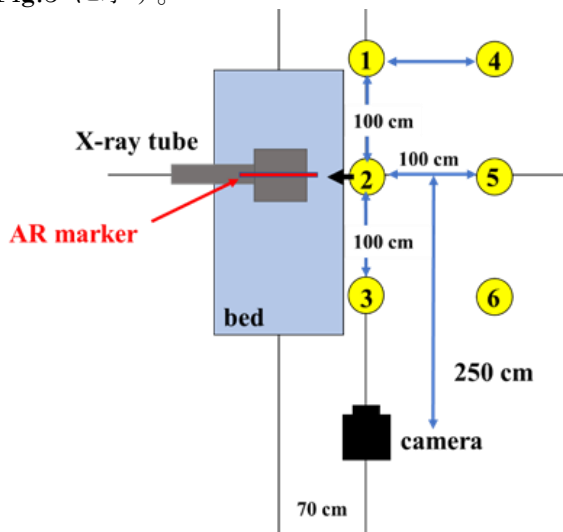


Fig 5. 使用機器の配置と測定位置
寝台の短辺方向のカメラから照射野中心の距離は 250 cm、寝台の短辺方向のカメラから照射野中心の距離は 70 cm、各測定位置の間隔は 100 cm とした。

次にインバータ式 X 線高電圧装置 UD150L-30 (島津製作所、京都府、日本) を用いて照射を行った。シミュレーションと同じ撮影条件 (Table 2) で照射した際に、RaySafe X2 (Unfors RaySafe AB, Billdal, Sweden) を用いて入射表面線量を、RaySafe i3 (Unfors RaySafe AB, Billdal, Sweden) を用いて X 線室内のシミュレーションで取得した同じ位置における個人線量当量を測定した。RaySafe X2 は照射野中心に検出部の中心が一致するように配置した。測定は測定位置ごとに 3 回行い、シミュレーション値と測定値の比較解析を行った。

Table 2. 実験における透視条件

Tube voltage	87 kV
Tube current	50 mA
Irradiation time	4 s

Irradiation field	15×15 cm ² (at 92.5 cm from the focus)
Source-bed distance	107.5 cm
phantom	water

B.3 関節点検出の精度評価

術者のボディトラッキングの精度を評価するためにマネキン SD206RE (株式会社サンクリエイト、日本) を使用した。マネキンの身長は 180 cm、表面色はアイボリーである。ボディトラッキングを正確に行うためマネキンの顔に仮面を被せた。仮面による鼻などの凹凸があることでマネキンが向いている方向が検出されやすくなる。AR マーカー右下から各関節点までの距離をシステムから取得し、レーザー距離計 GEANEE MK-LAK (株式会社 JENESIS HOLDING、東京都、日本) を用いて測定した。その後、システムから取得した距離と実際に測定した距離を比較した (Fig.6)。測定は Fig.5 の 1、2、3、5 の位置で行った。

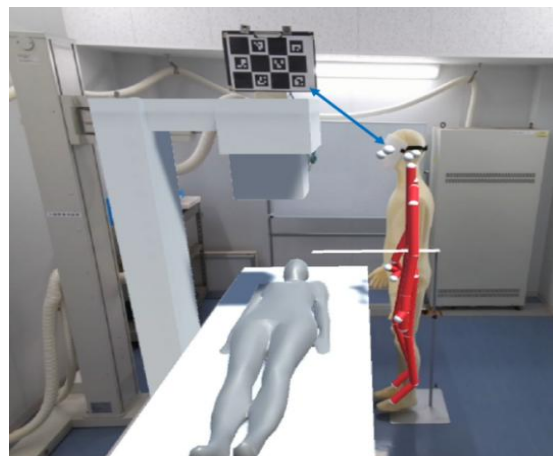


Fig 6. 測定した 2 点間の距離
図上に示す青い矢印の距離を測定した (図上では左眼)

2.4 リアルタイム性能の評価

システムがスムーズに作動するか評価するため、Unity の Stats 機能により 1 秒あたりのフレームレート (fps :frame per second) を測定し、システムのリアルタイム性能を評価した。フレームレートの測定は、術者が 25 cm/s で動く場合と動かない場合、防護エプロンの有無という 4 つの術者の条件にわたって行われた。防護エプロン SLB-25M (株式会社マエダ、東京

都、日本)は前面のみを保護するもので、オレンジ色をしていた (Fig.7)。測定結果は、Excelを用いてウェルチの T 検定をして術者の状態の違いによるフレームレートの差があるか評価した。

Fig 7. 防護エプロンを着てフレームレートを測定している様子

B.5 線量推定の精度評価

本システムによる線量の推定精度を評価するためにマネキンを使用した。システムが線量を取得できる 7 つの関節点 (右眼、左眼、首、胸、骨盤、右手、左手) に RaySafe i3 を取り付け、個人線量当量を測定した。RaySafe i3 は角度依存性を示すため、主な散乱線源である水ファントムを向けてマネキンに取り付けた。このとき RaySafe i3 の計測と同時に開発したシステムを用いて個人線量当量を取得した (Fig. 8)。マネキンは Fig.5 の 1、2、3 の 3 つの測定位置で線量を測定した。各測定位置 3 回の測定を行った。その後、測定値とシステムによる推定値を比較した。



Fig 8. システムによる線量推定精度の検証における実験の配置

マネキンの関節点 (右眼、左眼、首、胸、骨盤、右手、左手) に線量計を装着した
マネキン、マネキンに装着した線量計ともに照射野中心を向くように配置した

C 結果

3.1 システムの概要

開発したシステムのユーザーインターフェースを Fig.9 に示す。左側は散乱線のシミュレーションデータが X 線室の点群データと重なって表示されている。この表示により、任意の二次元断面内の散乱線分布を観察することができる。また、散乱放射線の二次元断面を選択して表示することができ、色のスケールも調整可能である。さらに、線量分布の視覚的に観察しやすくするために、スムージング機能が

組み込まれている。インターフェースの右側には、線量推定機能があり、各関節点の線量を色と数値で表示している。この値は各関節点の個人線量当量を水ファントムの入射表面線量で除した値である。

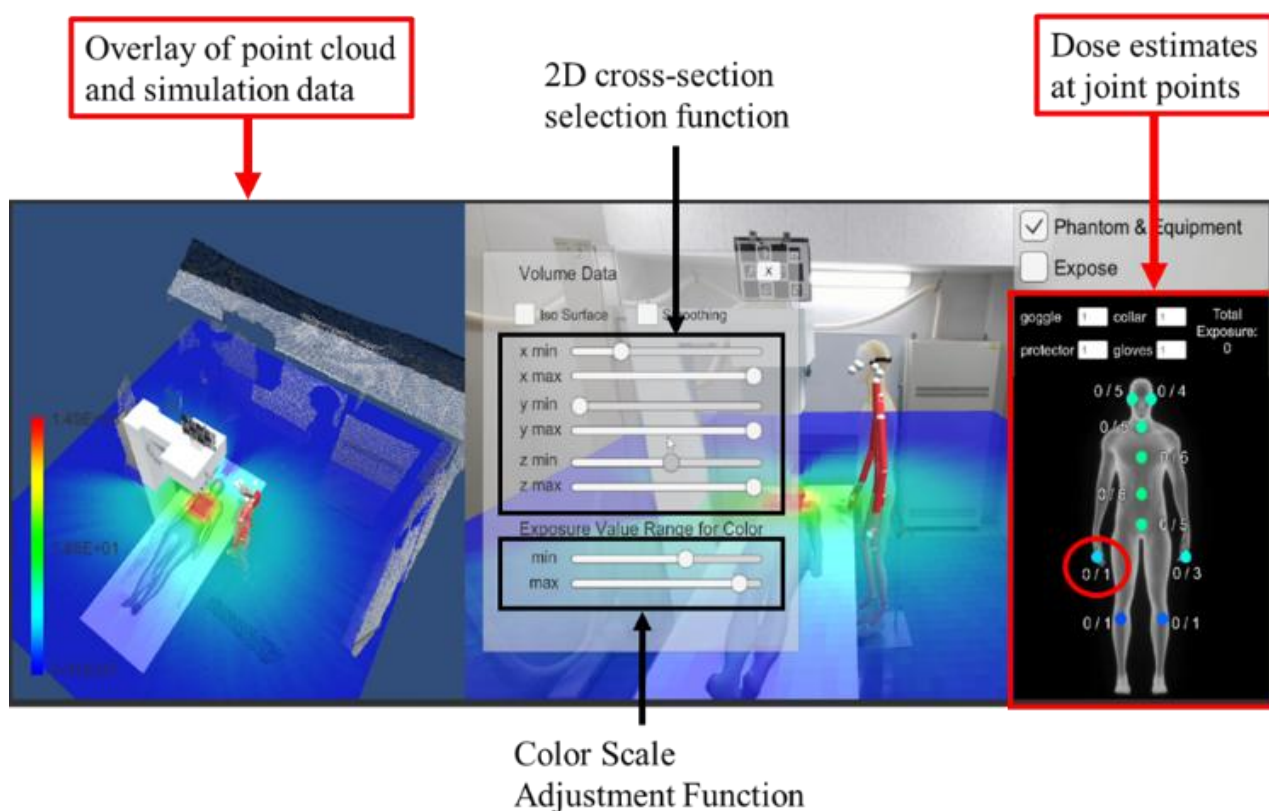


Fig 9. システムのユーザーインターフェース

左側：散乱線のシミュレーションデータと X 線室の点群データの表示。中央：色のスケール、断面選択、スムージング機能。右側：線量推定機能

C.2 モンテカルロシミュレーションの精度評価

測定位置 6 カ所、高さ 3 点における個人線量当量の実測値とシミュレーション値の比を Fig.10 に示す。エラーバーは線量計の測定値のばらつきに起因する標準偏差を示している。実測値と推定値の比は 80%から 120%の間に収まっていた。

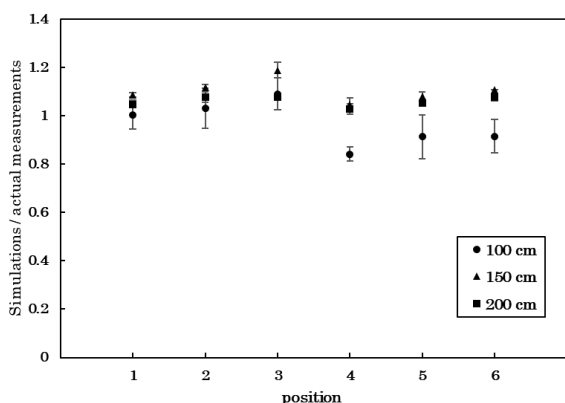


Fig 10. 各測定位置と各高さにおけるシミュレーション値と実測値の比較

C.3 関節点検出の精度評価

システムが推定した値から実測した値を引いた差を Fig.11 に示す。カメラからの距離が遠いと推定値より実測値のほうが大きい値になる傾向がある。また、眼よりも手のほうが比較的ボディトラッキングの誤差が小さい結果になった。カメラから最も遠い位置では大きい標準偏差を示している。

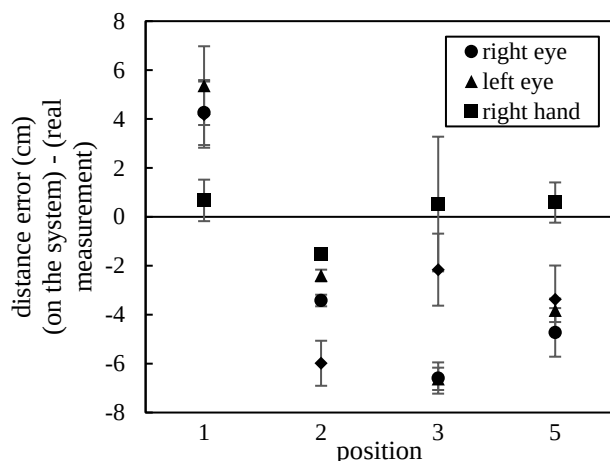


Fig 11. システムが推定した距離から実測した距離を差分した距離

C.4 リアルタイム性能の評価

Table 3 に術者が秒速 25 cm で動いているとき動いていないとき、防護エプロンを装着したときしてないときの平均フレームレートを計測した結果を Table 3 に示す。術者の各状態の違いによるフレームレートに有意差があるか有意水準 5% でウェルチの T 検定を行ったところ防

護エプロンなしで動き有と無しの間には有意差はなかったものの他の状態の間には有意差があった。

Table 3. real-time performance evaluation

apron	motion	average frame rate (fps)
-	-	10.9±0.7
-	+	11.0±0.7
+	-	9.0±0.5
+	+	9.8±0.4

+ ... 防護エプロン有り、動き有り

- ... 防護エプロン無し、動き無し

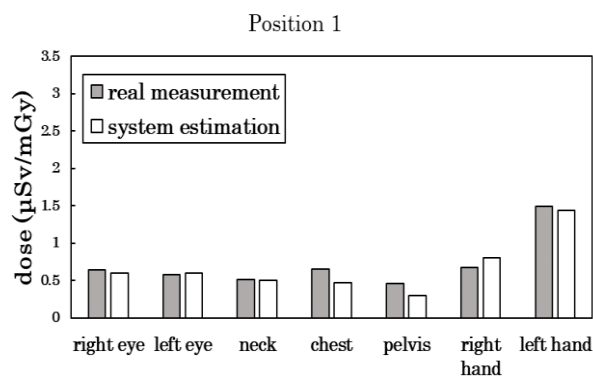
有意差あり...SSD (statically significant difference)

有意差なし...NS (not significant)

C.5 線量推定の精度評価

線量の測定結果を Fig.12 に示す。縦軸は入射面線量 1 mGy あたりの個人線量当量を示している。線量計で測定した線量はマネキンの体表面における個人線量当量を示し、推定線量はボディトラッキングした関節点における個人線量当量を示している。Position2 は 1、3 に比べて散乱線源である水ファントムに近いため線量が大きくなった。マネキンは手を前方に出していたため水ファントムに近く他の関節点に比べ手の線量が大きくなった。Table 4 は本システムによる推定線量を線量計で測定した線量で除した比を示したものである。線量比は各関節点で 0.60 倍から 1.21 倍であった。胸部と骨盤を除くすべての関節点で線量比は 0.93 倍から 1.21 倍であった。胸部と骨盤の 2 つの関節点では推定線量は実測値よりも著しく低く、最も

低い場合の線量比はそれぞれ 0.72 倍と 0.60 倍であった。



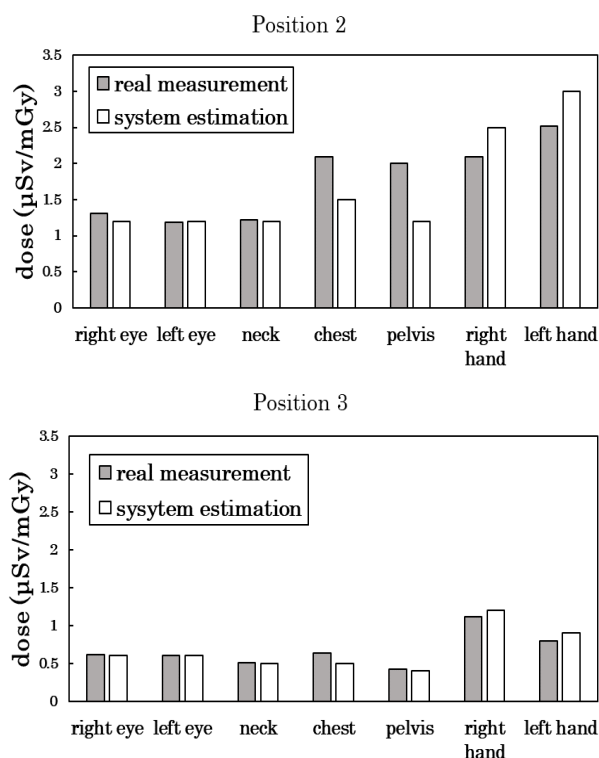


Fig 12. 各測定位置における関節点の測定線量と推定線量

Position2 は 1、3 に比べて散乱線源である水ファントムに近いので線量が大きくなった
マネキンは手を前方に出していたため水ファントムに近く他の関節点に比べ手の線量が大きくなった

Table 7. 各測定位置におけるシステムで取得した線量を実測の線量で除した線量比

	①	②	③
right eye	0.94	0.93	0.98
left eye	1.04	1.01	1.00
neck	0.98	0.99	0.98
chest	0.72	0.72	0.78
pelvis	0.67	0.60	0.94
right hand	1.19	1.21	1.08
left hand	1.00	1.19	1.14

本システムで使用した散乱線分布の術者の胸の高さ（130 cm）の照射野中心から術者の体厚方向の線量分布を Fig.13 に示す。マネキンの体表面は照射野の中心から約 80 cm の位置にあり、体厚は 20 cm であった。この条件下での位置の

相違による線量の差はシミュレーションによると約 20%であった。

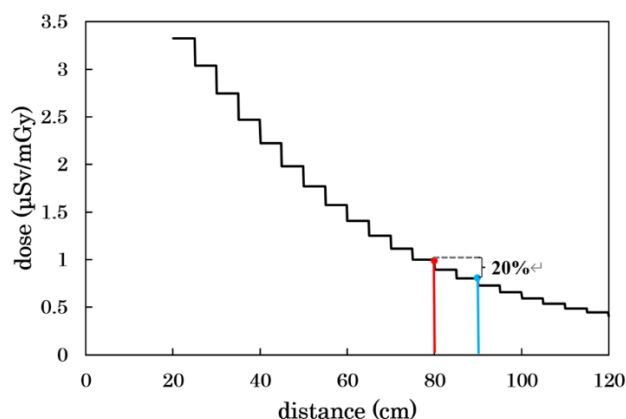


Fig 13. 術者の胸の高さにおける照射野中心から術者の体厚方向の散乱線分布

D 考察

D.1 モンテカルロシミュレーションの精度評価

理想的には実測値とシミュレーション値の比はすべての場所で 100%に保たれるべきである。しかし、測定位置のばらつき、線量計の角度依存性、シミュレーションデータの分解能などの要因により、誤差が生じることが予想される。先行研究では、80 kV で CRA (cranial)角度を 5°、トップダウン視点で測定したアイソセンタの左側に 5 cm の患者テーブルを移動させた場合の散乱線分布の差分パーセントを評価したところ、約 20%以内に収まった報告がある。X 線室内で再現した散乱線分布の精度は、先行研究で観察された誤差と同様に差分パーセント約 20%以内であった。

D.2 関節点検出の精度評価

ボディトラッキングの標準偏差は眼よりも手の方が比較的小さい。これはマネキンがカメラに対して横を向いているため、眼のボディトラッキングが困難であるためと考える。カメラから最も遠い位置の測定値が大きい標準偏差を示している。これは Azure Kinect の WFOV unbind モードを利用しているためと考える。WFOV unbind モードは、広視野での高解像度撮影を可能にする。WFOV unbind モードの公称測定距離は 0.25 m から 2.88 m であるが、カメラから最も遠い Position1 ではカメラとマネ

キンの距離が 3.5 m である。これは WFOV unbind モードの公称測定距離を大幅に超えている。その結果、大きな標準偏差となったと考えられる。これらの結果からシステムを作動させる場合には、公称測定距離を考慮しなければならない。

D.3 リアルタイム性能の評価

J. Troville らによると防護エプロンを装着した場合でも腰、首、頭のボディトラッキングが失敗することはないとされている。本研究では防護エプロンなしで動き有と無しの間には有意差はなし、他の状態の間には有意差があるという結果になったものの、作成したシステムでも同様にボディトラッキングは正しくおこなわれていた。今回検証した条件ではシステムのリアルタイム性を著しく低下させるものはなかった。

D.4 線量推定の精度評価

胸部と骨盤の 2 つの関節点では推定線量は実測値よりも著しく低かった。この差は胸部と骨盤の体厚が他の測定された関節点に比べて厚いことが原因であると考えられる。Fig.13 に示すように 10 cm の測定位置のずれで約 20% の線量の誤差が発生する。本システムが体幹部をボディトラッキングするのに対し、実際の測定は体表面の線量を測定するという測定位置の相違が線量比に大きく影響したと考えられる。

D.5 本システムの有用性と課題

本研究で開発したシステムはボディトラッキングと散乱線の可視化技術を活用し、散乱線と術者の位置との関係を、VR 内でリアルタイムに把握することができる。その結果、本システムは安全上のリスクとなる高線量被ばくの可能性がある場所を直感的に把握できる貴重なツールである。さらに、従来の個人線量計は体の特定の部位に基づいて被ばく線量を測定していた。しかし、本研究の衝突判定を用いたアプローチにより、線量計の位置に関係なく術者の指先や頭部などの被ばく線量をリアルタイムで推定することが可能となる。これらの機能により X 線検査室内における散乱線の理解が深まるため、放射線防護教育に有用であると考えられる。

本研究では 1 種類の装置と特定の照射条件を使用した。多様な臨床現場の条件に対応するためには、他の装置と照射条件を含む追加のシ

ミュレーションが必要である。さらに、臨床現場では防護板が広く使用されていることを考慮すると、これらの防護板を組み込んだシミュレーションが必要である。このシミュレーションには膨大な時間がかかるため、多様な臨床現場の条件に対応するために事前にデータをシミュレーションする必要がある。さらに、手技中の照射条件が変化した際にシミュレーションしたデータを差し替える方法を検討する必要がある。

本研究のシステムでは、散乱線分布の事前にシミュレーションしたデータを利用している。これは事前に術者のいない X 線検査室内の散乱線をシミュレーションしたデータであるため、術者の位置に対応した散乱線分布の変化は考慮されていない。術者の位置による散乱線の乱れを推定するために、アプリケーション (X-Scatter-STK-3) を使用した。アプリケーションによると本システムで使用した条件において散乱体から 50 cm 離れた位置では最大 0.2% の散乱線が増加する可能性がある。距離の逆 2 乗則に従い 10 cm 離れた位置では散乱線が最大 5% 増加させる可能性があると予想される。本研究で使用した線量計は角度依存性を示し、マネキンからの後方散乱の測定には限界がある。本研究においてはマネキン表面の線量を線量計で測定している。そのため、マネキンからの後方散乱の影響は本研究において推定線量と測定した線量ともに考慮されていない。しかし、実際には術者の位置により散乱線分布は変化するため、推定システムの改善、線量の評価方法の検討が必要である。

また、現在の線量推定システムの精度は満足できるものではないと考えられ、特に胸部と骨盤部における線量推定精度を向上させる必要がある。線量率の推定精度を向上させる方法についてさらなる検討が必要である。

E 結論

開発したシステムは深度カメラを用いたボディトラッキングにより、散乱線分布の任意の 2 次元断面を点群データ上に表示することができ、リアルタイムでの線量推定が可能となった。線量推定に使用した散乱線分布のシミュレーションデータは、実測値と比較して 20% の誤差を示した。システムのフレームレートは約 10 fps であり、リアルタイム性能を示した。本システムは複数の関節点の線量を線量計で測定した線量

の 0.6 倍から 1.2 倍で推定することに成功した。本システムはリアルタイムでの線量推定が可能となったため、放射線防護教育で重要な散乱線の挙動の理解に役立つと考えられる。

F. 健康危険情報

なし

G. 研究発表

1. 論文発表
14. Fujibuchi, T.; Arakawa, H.; Anam, C. Development of a Real-Time Radiation Exposure Estimation Method Using a Depth Camera for Radiation Protection Education. Radiation, 4, 261-275, 2024.
2. 学会発表
1. Kenta Honiden, Toshioh Fujibuchi. Development of a warning system for radiation exposure during X-ray fluoroscopy by monitoring the surgeon's position using a depth camera. The 78th annual meeting of the JSRT, Yokohama, April 14-17, 2022.

2. 本井傳健太, 藤淵俊王, 荒川弘之. 深度カメラを利用した術者位置モニタリングによる X 線透視時の職業被ばく推定システムの開発. 第 4 回日本保健物理学会・日本放射線安全管理学会合同大会, Fukuoka, November 24-26, 2022.
3. Kenta Honiden, Toshioh Fujibuchi, Hiroyuki Arakawa. Development of an Occupational Exposure Estimation System during X-ray Fluoroscopy by Body Tracking Using a Depth Camera. 7th International Symposium on the System of Radiological Protection, Tokyo, November 6-9, 2023

H. 知的財産権の出願・登録状況 (予定を含む。)

1. 特許取得
なし
2. 実用新案登録
なし
3. その他
なし

労災疾病臨床研究事業費補助金
総合（令和4年度～令和6年度）分担研究報告書
デジタルトランスフォーメーションを活用した医療従事者の被ばく低減プログラム
の開発と有効性の検証（220201）

診断用 X 線におけるピンホールコリメータと高感度 CMOS カメラによるリアルタイムでの散乱線源の可視化

研究分担者 藤淵 俊王 九州大学大学院医学研究院保健学部門医用量子線科学分野 教授

研究要旨

本研究では、ピンホールコリメータを搭載した高感度 CMOS カメラを用いて、画像診断に関連するエネルギー範囲内で散乱放射線をリアルタイムに可視化する方法を提案する。また、モンテカルロシミュレーションを使用して、測定データが実際の散乱放射線を正確に表しているかどうかを検証する。CMOS カメラ、CsI シンチレータ、ピンホールコリメータを用いてリアルタイム散乱放射線イメージングシステムを開発した。ピンホールの直径や露光時間など、さまざまなパラメータを評価し、最適な構成を特定した。さらに、モンテカルロシミュレーションを使用し、測定データをシミュレートされた散乱放射線分布と比較した。本システムは、高い空間分解能で散乱放射線源の可視化に成功した。最適なパラメータは、ピンホールの直径 2mm、露光時間 50 ミリ秒であり、画像の鮮明さと効率のバランスが取れている。測定データはシミュレーション結果とほぼ一致し、システムの精度を確認した。提案したシステムは、散乱放射線のリアルタイム可視化を可能にし、臨床現場での放射線防護を強化する大きな可能性を提供する。診断手順におけるより安全な作業環境と効果的な放射線安全管理の実現に貢献すると期待される。

研究協力者

Lee Hyojin

九州大学大学院医学系学府保健学専攻医用量子線科学分野

A. 研究目的

医療現場における放射線の使用は拡大しており、X 線は診断目的で広く活用されている。正確な画像診断には、高齢者や子供、頸椎の固定が必要な外傷患者、呼吸補助が必要な重篤な患者など、じっとしていることができない患者の診療において、介護者や医療スタッフの支援が不可欠である。しかし、散乱放射線は、患者の被ばく中に発生し、介護者や医療スタッフに潜在的なリスクをもたらす。これらの散乱放射線源は肉眼では感知できないため、視覚化することで、高線量の危険ゾーンと低線量の安全ゾーンを特定する重要な情報を提供できる。この視覚化は、介護者と医療従事者が処置中に適切な保護措置を実施するうえで有用である。

散乱放射線の可視化に関する研究には、モンテカルロシミュレーションやイメージングプレ

ート(IP)を利用する方法が含まれる。モンテカルロシミュレーションでは、散乱放射線分布の解析が可能であるものの、計算時間が長く、デバイスの構造や条件を正確に再現する必要があるため、実用化には制限がある。一方、IP を用いた手法は、散乱放射線の分布を直接捉えることができるが、読み取り装置が必要であり、記録画像へのアクセスに時間がかかるため、リアルタイムな観測には適していない。

これらの課題を踏まえ、本研究では、シンチレータとデジタルカメラを用いて散乱放射線をリアルタイムに可視化する方法を提案する。これまでの研究では、シンチレータとデジタルカメラを組み合わせた構成で一次ビームの可視化が行われてきたが、散乱放射線への応用については十分に検討されていなかった。本研究では、

この手法を特に散乱放射線の観測に適応させ、実践する。

本研究の目的は、ピンホールコリメータを搭載した高感度 CMOS(Complementary Metal-Oxide-Semiconductor)カメラを用いて、X 線イメージング診断に関連するエネルギー範囲内で散乱放射線をリアルタイムに可視化することである。また、モンテカルロシミュレーションを採用し、測定データが実際の散乱放射を正確に表しているかどうかを検証する。さらに、ピンホールのサイズとカメラの露光時間を変化させ、効果的な視覚化に必要な最適なピンホールサイズと最小露光時間を特定することを試みる。

B 方法

B-1 リアルタイム散乱放射イメージングのための実験セットアップ

B.1.1 散乱線リアルタイムイメージングシステム

本研究では、散乱光をリアルタイムに可視化するために、散乱線リアルタイムイメージングシステムを開発した。このシステムは、相補型金属酸化膜半導体 (CMOS) カメラ (ORCA-Quest、浜松ホトニクス株式会社、静岡)、ヨウ化セシウム (CsI) シンチレータ (Great Performance X-ray CsI Scintillator J13113、浜松ホトニクス株式会社、静岡市)、RGB カメラ (Intel RealSense Depth Camera D435、Intel Corporation、米国)、ピンホールコリメータ、およびサポートデバイスで構成されている。構築したシステムを図 1 に示す。

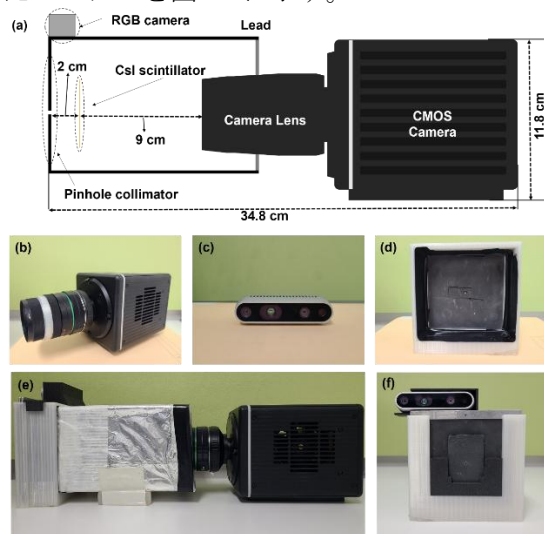


図 1 ピンホールコリメータを用いた散乱放射可視化システムの構成。(a)システムの概略図、(b)CMOS カメラ、(c)RGB カメラ、(d)ピンホールコリメータとリードケース、(e)システムの側面図、(f)システムの正面図。

CMOS カメラは、高い量子効率と低ノイズ性能を提供し、弱い光信号を正確に検出することができる[17]。短い露光時間でも信号品質を維持できるため、高速イメージングが容易になる。画像データは、CMOS カメラ専用アプリケーションである High-Speed Recording Software(浜松ホトニクス株式会社)で処理した。集光を最適化するために、カメラには F2.4 レンズ(SMC Pentax-Da 35 mm、ペンタックスコーポレーション)を使用した。

CsI シンチレータとして、CsI(Tl) (タリウム活性化ヨウ化セシウム)を柱状構造にした高性能 X 線シンチレータを使用した。この構造により、光の散乱を防ぎ、高い空間分解能での出力が可能である[18]。CsI シンチレータの外形寸法は $50 \times 50 \text{ mm}^2$ で、有効検出領域は $45 \times 45 \text{ mm}^2$ である。シンチレータ層の厚さは $400 \text{ }\mu\text{m}$ 、基板の厚さは 0.5 mm である。

X 線装置、ファントム、その他の物体の可視光像は、RGB カメラを使用した。カメラはピンホールの中心から 7.1 cm 上に配置され、最適な画像取得を確保した。

ピンホールコリメータは、直径 2 mm と 3 mm のものを利用した。これは、 $12.0 \times 12.0 \times 0.3 \text{ cm}^3$ の寸法のリード プレートで構成されており、散乱放射を特定方向に制限してイメージング精度を向上させるように設計されている。

ピンホール、シンチレータ、カメラレンズは、厚さ 2 mm のリード線で作られた $10.2 \times 15.5 \times 10.5 \text{ cm}^3$ のハウジングに封入され、ピンホールを通さない場合を除いて、散乱放射線と外部光の侵入を防ぎ、遮蔽した。さらに、3D プリンタ (Flash Forge Finder、Flashforge Corporation、中国)を使用してカスタムフィクスチャを製作し、ピンホールコリメータとシンチレータの正確な垂直方向の位置合わせを確保した。

ピンホールコリメータとシンチレータの距離は 2 cm 、シンチレータとカメラの距離は 9 cm に設定した。ピンホールコリメータとシンチレータの距離を 2 cm とすることで、ピンホールを通過する散乱放射がシンチレータ全体に効率よ

く投影され、観測エリア全体をカバーできるようにした。この構成は、シンチレータから 9cm の位置に配置されたカメラによってキャプチャされた視野(2.7 cm)に基づいて決定した。

また、シンチレータとカメラの距離は、カメラの光学特性がブレなくクリアでビントの合った撮像を可能にする最小距離と判断したため、9 cm に設定した。これらの距離パラメータは、散乱放射のリアルタイムな可視化を容易にするために最適化された。

B.1.2 実験条件と配置

X 線照射は X 線管装置 (UD150L-30、島津製作所)を用いた。詳細な実験条件を表 1 に示す。照射条件は、腹部イメージングパラメータの例に基づき実施した[19]。

表 1 X 線照射実験条件

管電圧 [kV]	74
管電流 [mA]	250
露光時間 [秒]	0.14
線源－画像検出器間距離 [cm]	101
照射野 [cm ²]	30 × 30

散乱放射線イメージングシステムの実験配置を図 2 に示す。30 cm × 30 × 15 cm³ の寸法のウォーターファントムを、患者を模擬した散乱物体として利用した。ファントムを患者テーブルに置き、X 線ビームは天井から床方向とした。ピンホールカメラはウォーターファントムの中心から 150 cm の位置に配置し、ファントムと X 線管の両方がカメラの視野内に収まるように高さを調整した。ピンホールの中心から床までの距離は 94.2 cm として測定した。

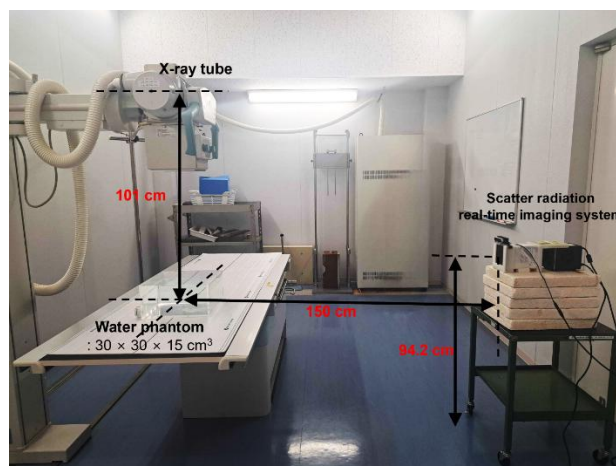


図 2 散乱放射可視化のための配置

CMOS カメラによる画像取得では、解像度を 1024 × 576 ピクセルに設定し、4 × 4 ビニング、ビット数を 16 ビットに設定した。2、5、50、および 200 ミリ秒の露光時間を比較して、最適なイメージング条件を決定した。また、散乱放射線画像の線量率を評価するために、半導体ベースのサーバイメータ (Raysafe X2、Unfors Raysafe、Billdal、Sweden)を使用した。この測定により、指定された線量率が現在の散乱放射線の可視化レベルを可能にすることが検証され、線量率と可視化品質との関係を理解するためのベースとした。ピンホールコリメータの位置にサーバイメータを配置し、コリメータに到達する線量率を測定した。

B.1.3 散乱線のリアルタイム可視化

介護者や医療スタッフに適切な防護対策のためのデータを提供するためには、散乱線の発生源を特定することが不可欠である。この目的のためには、散乱放射の可視化画像と背景画像を重ね合わせる非常に効果的です。これらの画像を組み合わせるために、カスタムアプリケーションを使用した。

散乱線画像と背景画像の撮影には、それぞれ CMOS カメラと RGB カメラを使用したため、2 台のカメラの視野と設置位置の違いによる位置ずれを補正した。散乱線可視化画像と背景画像を組み合わせる方法を図 3 に示す。図 3(a)に示すように、コリメータとファントムの頂点には、青色の発光ダイオード(LED)電球が 8 個取り付けた。次に、LED を含む画像を RGB カメラによりキャプチャし、背景画像を作成した。

続いて、図 3(b)に示すように、トレーシングペーパーをシンチレータの内部の位置に配置し、図 3(a)の各 LED ライトの中心を図 3(b)の各 LED 視覚化画像の中心に揃えるように平行移動した。

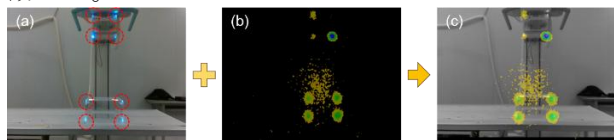


図 3 散乱放射画像と背景画像を組み合わせる方法。(a)RGB カメラでキャプチャした LED 電球の位置(赤い破線の円の領域)、(b)散乱放射画像、(c)最終的な包括的な画像。

B.2 画像評価指標

画質を評価するために、S/N 比(SNR)とコントラストを用いて解析した。SNR の計算では、画像内に 2 つの関心領域(ROI)が定義され、1 つは信号領域を表し、もう 1 つは背景領域を表す。信号領域は X 線管とファントムを含み、信号の識別の可能性は、背景領域の平均強度に基づいて評価した。

コントラストの分析には、関心領域内の最大強度と最小強度の差に基づいて、画像内の信号強度変動から評価し。この手法は、画像解析で広く使用されている指標であり、画像の背景からの信号の識別能に対する画質の影響を評価するのに特に役立つ。

これらの解析は、ImageJ(バージョン 1.54g、米国国立衛生研究所、米国)を用いた。このソフトウェアを利用して、定義された ROI 内の統計値を抽出し、さまざまなイメージング条件で SNR とコントラストを定量的に評価した。このアプローチにより、ピンホールのサイズとカメラの露光時間が画質に与える影響が明らかになり、最終的に最適なイメージング条件を特定した。

B.3 モンテカルロシミュレーションで得られた画像の検証

ピンホールを通過してシンチレータに到達する放射線が散乱放射線で構成されているかどうかを検証するために、モンテカルロシミュレーションを実施した。この目的のために、粒子・重イオン輸送コードシステム (PHITS) バージョン 3.341 を利用し、測定データとシミュレーション結果との比較した[20]。シミュレーション

では、シンチレータ上の磁束分布を計算し、測定データとシミュレーション結果の両方から、ファントムの垂直軸からファントムの中心を通るデータをプロファイルとして抽出した。

図 4 に示すように、シミュレーションのジオメトリは、散乱線リアルタイムイメージングシステムの構成と、実験で使用されたシンチレータの配置を再現するように設計されている。ピンホールの直径は 2 mm と 3 mm に設定し、ピンホールからシンチレータまでの距離(2 cm)とシンチレータからカメラまでの距離(9 cm)は実験条件と同一にした。

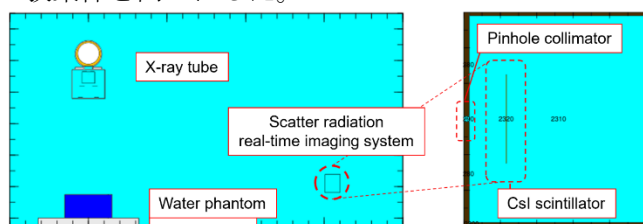


図 4 モンテカルロシミュレーションで使したシステム構成

SpekPy Web という web アプリケーションにより X 線スペクトルを決定し、連続スペクトルを持つ光子源が放射線源として構成され、エネルギー範囲は 0 keV から 74 keV とした[21]。

PHITS の機能である T-Point タリーを、シンチレータ表面の散乱放射プロファイル計算に利用した。得られたプロファイルを、測定データおよびシミュレーション結果と比較した。比較のために、最大値を 1 に設定して正規化した。

C. 結果

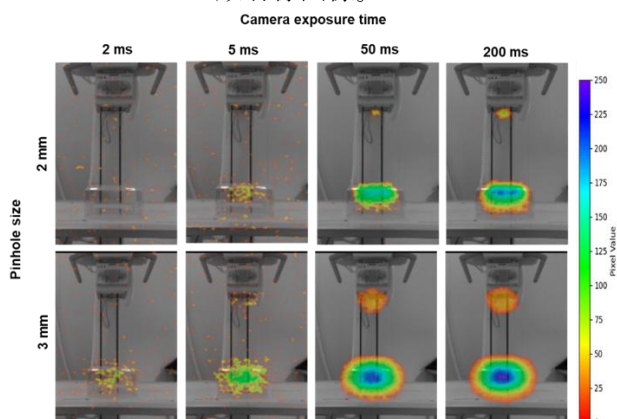
C.1 実験からの散乱放射線源分布

図 5 に、複合 RGB 画像と散乱放射画像のリアルタイム可視化を示す。視覚化は、さまざまなカメラの露光時間とピンホールサイズを使用した。散乱線源は、X 線管と水ファントムの 2 つの場所で特定された。カメラの露光時間を長くすると、散乱放射分布の鮮明さが向上することが観察された。画像では、色は放射強度を表し、青は高強度、赤は低強度を示し、ピクセル値に対応している。

ピンホールサイズ 2 mm では、散乱線源の形状や分布が比較的鮮明に観測され、より高い空間分解能を実現した。対照的に、3 mm のピンホール サイズでは、2 mm のピンホールと比

較して分布が広くなり、空間の詳細解像度が著しく低下した。これは、ピンホールのサイズが散乱線源の視覚化に大きく影響することを示している。また、ピンホールコリメータに到達する線量率は $10.71 \mu\text{Sv/s}$ 、総線量は $2.10 \mu\text{Sv}$ であった。

図 5 ピンホールとカメラ露光時間の比較散乱放射線画像。



C.2 画像解析

SNR とコントラストはどちらも、カメラの露光時間が長くなるにつれて全体的に増加する傾向を示した。ピンホールサイズが 2 mm と 3 mm の場合、露光時間が長くなると SNR とコントラストが向上したが、2 つのピンホールサイズ間で間隔が異なった。

ピンホールサイズの影響については、3mm ピンホールは 2 mm ピンホールと比較して一貫して高い SNR 値を示した。この違いは、ピンホールが大きいと、より多くの信号を収集できるためと考えられる。逆に、2 つのピンホールサイズ間でコントラストに大きな差は見られず、コントラストの変化は主に露光時間の変動の影響を受けた。

C.3 モンテカルロシミュレーションと実験測定との比較

測定データがウォーターファントムと X 線管からの散乱放射分布を正確に表しているかどうかを判断するために、モンテカルロシミュレーションを使用して比較した。具体的には、リアルタイム散乱放射線イメージングシステムから得られた測定データと、PHITS で生成された散乱放射線分布プロファイルと比較した。

図 6 に、実験測定とシミュレーションの両方

から得られた散乱放射の空間分布プロファイルを示す。図 6(a) は測定データを示し、図 6(b) はシミュレーションから生成された対応するプロファイルを示す。縦軸は正規化された強度値を表し、横軸は視野 (FOV) 内の空間位置をセンチメートル単位で表す。

実験設定では、散乱放射を 2.7 cm の FOV で視覚化し、対応するピクセル位置をイメージングシステムの光学特性に基づいて物理的な距離にマッピングした。直接比較を可能にするために、PHITS シミュレーションでは、実験設定との一貫性を維持しながら、同じ空間範囲でフルエンス値を抽出した。

その結果、シミュレーションデータと測定データの両方に、水ファントムと X 線管からの散乱放射に対応する 2 つの顕著なピークが見られた。ピンホールのサイズに関しては、ピンホールの直径が 2 mm の場合、ピーク分離と空間分解能が向上するのに対し、ピンホールの直径が 3 mm の場合、ピークが近接する代わりにシグナル強度が高くなった。

これらの知見は、リアルタイムイメージングシステムが散乱放射を効果的に可視化し、PHITS シミュレーションがシステムのパフォーマンスを最適化および評価するための信頼性の高いフレームワークを提供することを裏付けている。

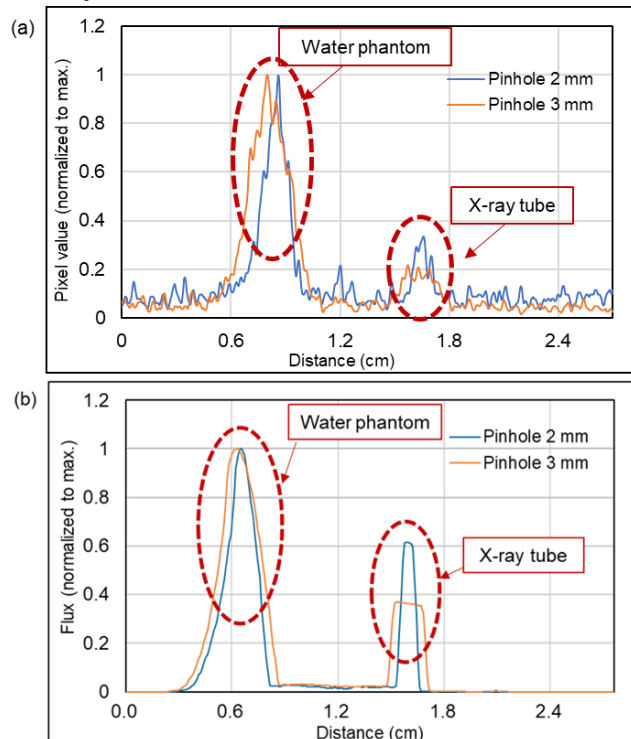


図 6 モンテカルロシミュレーションと実験測定の散乱放射分布の比較 (a) 測定プロットプロファイル (b) シミュレーションプロット pro ファイル

D 考察

本研究では、高感度 CMOS カメラを用いて散乱光のリアルタイム可視化を行い、ピンホールサイズとカメラの露光時間が散乱光の観測に及ぼす影響を評価した。露光時間が 2 ms、5 ms、50 ms、200 ms であることから、露光時間が短いことと画質のバランスがとれた状態が 50 ms であることが分かった。その結果、長時間の露光は不要であることが判明し、リアルタイム観察のための効率的な条件を決定することが可能になった。露光時間が短い(2 ms と 5 ms)と、ノイズによる画質の低下が見られた。また、本試験の結果、ピンホールに到達する線量率は 10.71 $\mu\text{Sv/s}$ であることが確認され、一般 X 線撮影におけるリアルタイム観察に十分な適用性が示された。この線量率から、散乱線源メーキングが可能な環境線量率条件を推定することができる。この推定により、ポータブルイメージングやより遠方の観測へのシステムの応用についての議論が可能になる。

本研究で開発した散乱放射線イメージングシステムは、3D プリントされた構造物の使用や手作業による組み立てから生じるセットアップエラーの影響を受ける可能性がある。ピンホールコリメータとシンチレータの位置合わせ、部品間の距離、機器の配置にわずかなばらつきがあると、画質や散乱放射分布の再現性に影響を与える可能性がある。これらのばらつきを最小限に抑えるためには、実験装置の位置合わせや位置を固定する治具の設計や、段取りの標準化が必要である。さらに、実験を繰り返してセットアップエラーの影響を定量的に分析し、許容誤差の範囲を定義することで、システムの再現性と信頼性が向上する。

次に、ピンホールサイズの違いが画像の空間分解能に与える影響を評価した。ピンホールサイズ 2 mm で散乱線分布が鮮明に観測され、詳細な評価に適していることが示された。これらの結果から、対物レンズに基づいて適切なピンホールサイズを選択することで、画像解析の精度が向上することが示唆される。

さらに、シミュレーションのプロファイルと

測定データの比較により、2 つのピークの存在が確認された。ピーク形状の一貫性は、シミュレーションをカメラシステムの最適化に利用できることを示唆している。しかし、強度分布とピーク位置にわずかな違いが見られ、これはシミュレーションにおける X 線装置の内部構造の再現性や実験環境の影響によるものと考えられる。シミュレーションの精度を向上させることは、今後の課題である。

シミュレーションの精度を向上させることは、今後の課題である。散乱線をリアルタイムで視覚化する機能により、医療スタッフや介護者に潜在的な高被ばく領域に関するフィードバックを即座に提供でき、それに応じて適切な位置と防護対策を提供できる。このシステムを透視法や病棟 X 線撮影などの臨床ワークフローに統合することで、放射線安全管理の改善に貢献し、不必要な被ばくを減らすことができると期待できる。

この研究は、リアルタイムの散乱放射線可視化の実現可能性を実証したが、放射線被ばく低減への直接的な影響を評価するには、さらなる研究が必要である。将来の研究では、システムの実装の有無にかかわらず、スタッフと介護者の用量レベルを比較するための臨床試験または対照実験が含まれる可能性がある。さらに、さまざまなイメージングモダリティや操作環境への適用性を調査することで、その臨床的有用性をさらに高めることができる。

E 結論

本研究では、ピンホールコリメータを用いた高感度 CMOS を用いたリアルタイム散乱放射可視化システムの開発と評価した。提案システムは、リアルタイム観測能力を維持しながら、高い空間分解能で散乱放射線源を特定する能力を実証した。体系的な評価を通じて、画像の鮮明さと効率のバランスを達成するための最適なパラメータとして、ピンホールの直径 2 mm と露光時間 50 ms が特定された。このシステムは、医療スタッフが散乱放射線の分布を視覚的に評価できるようにすることで、臨床現場での放射線防護を強化する大きな可能性を提供する。本技術の応用により、より安全な作業環境や診断時の放射線安全管理の効率化に貢献することが期待される。

参考文献

- 1) Cosette M Stahl, Quinn C Meisinger, Michael P Andre, et al: Radiation Risk to the Fluoroscopy Operator and Staff. AJR Am J Roentgenol 2016; 207: 737-744
- 2) G Bratschitsch, L Leitner, G Stüklshweiger, et al: Radiation Exposure of Patient and Operating Room Personnel by Fluoroscopy and Navigation during Spinal Surgery. Scientific Reports 9 2019; Article number: 17652
- 3) Alexandre Fogaça Cristante, Fábio Barbieri, Almy Anacleto Rodrigues da Sliva, et al: RADIATION EXPOSURE DURING SPINE SURGERY USING C-ARM FLUOROSCOPY. Acta Ortop Bras. 2019 Jan-Feb; 27(1): 46-49
- 4) Hajime Ito, Ikuo Kobayashi, Kazutoshi Watanabe, et al; Evaluation of scattered radiation from fluoroscopy using small OSL dosimeters. Radiol Phys Technol. 2019; 12: 393-400
- 5) Okasana Lesyuk, Patrick Emmanuel Sousa, Sônia Isabel do Espírito Santo Rodrigues, et al: Study of scattered radiation during fluoroscopy in hip surgery. Radiol Bras. 2016; 49: 234-240
- 6) Chuanpeng Wu, Liang Li, Senior Member IEEE: First Demonstration of Compton Camera Used for X-Ray Fluorescence Imaging. IEEE Trans Med Imaging 2023; 42: 1314 -1324
- 7) Akihisa Omata, Miho Masubuchi, Nanase Koshikawa, et al: Multi-modal 3D imaging of radionuclides using multiple hybrid Compton cameras. Scientific Reports 12 2022; Article number: 2546
- 8) Koichi Chida, Takeshi Takahashi, Daisuke Ito, et al: Clarifying and visualizing sources of staff-received scattered radiation in interventional procedures. AJR Am J Roentgenol 2011; 197: W900-3
- 9) Benjamin Fahimian, Andrew Ceballos, Silvan Türkcan, et al.: Seeing the invisible: Direct visualization of therapeutic radiation beams using air scintillation. Medical Physics 2013; 41: 010702
- 10) Akihisa Omuta, Jun Kataoka, Kazuya Fujieda, et al.: Performance demonstration of a hybrid Compton camera with an active pinhole for wide-band X-ray and gamma-ray imaging. Nature Scientific Reports 2020; 10: 14064
- 11) J. Kataoka, A. Kishimoto, T. Nishiyama, et al.: Handy Compton camera using 3D position-sensitive scintillators coupled with large-area monolithic MPPC arrays. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 2013; 732: 403-407
- 12) Laura Antonia Cerbone, Luigi Cimmino, Antonio Sarno, et al: Monte Carlo and experimental evaluation of Timepix4 compact gamma camera for coded aperture nuclear medicine imaging with depth resolution. Physica Medica; 113 (2023): 102663
- 13) Nicholas Stoffle, Lawrence Pinsky, Martin Kroupa, et al.: HERA: Timepix-based radiation environment measurements aboard the International Space Station. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 2015; 782: 143-148
- 14) Kroupa M, Campbell-Ricketts T, George SP, et al: Particle showers detected on ISS in Timepix detectors. Life Sci Space Res 2023; 39: 52-58
- 15) S. Procz, C. Avil, J. Fey, et al.: X-ray and gamma imaging with Medipix and Timepix detectors in medical research. Radiation Measurements 2019; 127: 106104
- 16) Polad M Shikhaliev, Shannon G Fritz, John W Chapman: Photon counting multienergy x-ray imaging: effect of the characteristic x rays on detector performance: Med Phys. 2009; 36: 5107-19
- 17) Anton S Tremsin, John V Vallerger, Oswald H W Siegmund, et al: Photon-counting MCP/Timepix detectors for soft X-ray imaging and spectroscopic applications. J Synchrotron Radiat. 2021; 28: 1069-1080
- 18) R. J. Proctor, G. K. Skinner, A. P. Willmore: The design of optimum coded mask X-ray telescopes. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 1979; 187: 633-643

F. 健康危険情報 なし

G. 研究発表

1. 論文発表

1. Hyojin Lee, Toshioh Fujibuchi, Donghee Han, Hiroyuki Arakawa, Visualization of the scatter radiation in real time using a high-sensitivity CMOS camera with pinhole collimator, Health and Technology, 2025.

2. 学会発表

5. Hyojin Lee, Toshioh Fujibuchi, Hiroyuki Arakawa, Donghee Han. Consideration of real-time visualization of scattered rays using a high-s-

ensitivity CMOS camera. The 24th Asia-Oceania Congress of Medical Physics (AOCMP 2024), Penang, October 10-13, 2024.

6. Lee Hyojin, 藤淵 俊王, Han Donghee. 高感度CMOSカメラを用いたX線CT検査時の散乱線源の可視化による放射線防護対策の検討. 第1回日本放射線医療技術学術大会(JCRTM 2024), 沖縄, 2024年10月31日-11月3日.
7. Lee Hyojin, 藤淵 俊王, Han Donghee. 高感度CMOSカメラとデブスカメラを用いた散乱線源の3次元イメージングに関する検討. 第19回九州放射線医療技術学術大会, 宮崎, 20

24年12月21日-12月22日

H. 知的財産権の出願・登録状況 (予定を含む。)

1. 特許取得
なし
2. 実用新案登録
なし
3. その他
なし

労災疾病臨床研究事業費補助金
総合（令和4年度～令和6年度）分担研究報告書
デジタルトランスフォーメーションを活用した医療従事者の被ばく低減プログラム
の開発と有効性の検証（220201）

可搬型半導体式放射線可視化カメラによる X 線検査での散乱線源のイメージング

研究分担者 藤淵 俊王 九州大学大学院医学研究院保健学部門医用量子線科学分野 教授

研究要旨

本研究の目的は、半導体式放射線可視化カメラによる X 線撮影での散乱線源のイメージングの最適な取得条件と画像処理方法を明らかにし、それを特性評価することである。可搬型の放射線可視化カメラを用いて、C アーム X 線透視装置での X 線撮影を測定した。撮影条件のうち、放射線防護板の高さ、照射野の大きさ、ファントムの有無、以上の 3 条件を変えて透視を行った。放射線可視化カメラから得たデータを基に散乱線の強弱をカラー表示した出力画像と光学カメラで撮影した画像とを重ね合わせた。ファントムで生じた散乱線と X 線管内で生じた散乱線を確認できた。出力結果からこの放射線可視化カメラを用いたイメージングが可能であると示された。リアルタイムイメージングを実現するには感度を上げる必要があり、今後はその適切な方法を検討する必要がある。

研究協力者

境 真由

九州大学大学院医学系学府保健学専攻医用量子線科学分野

A. 研究目的

X 線透視手技において、術者は X 線管や患者に近づいて手技をする必要がある。その際、術者はこれらから発生する散乱線により多く被ばくする可能性がある 1-5)。従って散乱線からの術者の被ばくの低減対策が求められる。散乱線源がイメージングできれば、医療従事者はその様子に基づいて放射線防護具を設置する、散乱線源と距離を取るなど、適切な放射線防護対策を検討できる。

これまで、ガンマ線源や散乱線源イメージングについての研究 6-9)が進められてきた。福島第一原発事故の際には環境中の放射線イメージングに可搬型のガンマカメラが開発された。それらの研究で用いられた検出器の一つにコンプトンカメラ 10, 11)がある。それはコリメータを必要としないという利点がある。しかしコンプトンカメラは、低エネルギー光子ではコンプトン散乱の発生量が少ない、十分な空間分解能を得られないという問題点がある 6)。

また、リアルタイムイメージングの先行研究

11,12)においては Cs -137 といった線源に対して行われ、ほぼリアルタイム表示が実現した。イメージングプレートを用いた先行研究 6)においては、可視光画像と散乱線源の画像が重ね合わせられている。この研究ではファントム表面における散乱線と可動絞り装置における散乱線の可視化に成功している。同実験においては線量率についても術者の水晶体の被ばくを無視できないことが示唆された。しかし撮影時間には 10 分、露光時間には 30 分を要しており、X 線透視における散乱線源をリアルタイムで検出する方法は確立されていないといえる。

近年、欧州原子核研究機構 Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire (CERN) で半導体式の放射線可視化カメラが開発され、物理学の分野で宇宙放射線の計測に用いられている 13, 14)。シリコンセンサを搭載したこの半導体式カメラの特徴は、入射光子のエネルギーとその飛跡をリアルタイム表示できる点である。更に高空間分解能を有しており、これまで多くの

医用画像において課題であった空間分解能についての解決が期待できる 15)。

そこで本研究では、小型で軽量の半導体性放射線可視化カメラを用いて X 線照射時の散乱線分布データをピンホールコリメータにより収集し、散乱線をリアルタイムにイメージングすることを目的とした。

B.方法

本研究では、放射線可視化カメラ MiniPIX EDU KIT (ADVACAM 社)を使用した (図 1)。このカメラは直接変換式シングルフォトンカウンティング検出器で検出した放射線の飛跡を 2 次元画像としてリアルタイムに表示することができる。専用ソフトウェアにて飛跡の形状から、 α 線・ β 線・ミューオン・光子線を識別子、種類ごとにエネルギースペクトルを表示することができる。寸法は 88.9 mm×21 mm×10 mm、重量は 30 g である。検出器には 14 mm×14 mm で 300 μ m 厚のシリコンセンサと TimePIX 17 (55 μ m ピッチ、256 × 256 ピクセル)が用いられている。TimePIX とは CERN で開発された技術であり、入射放射線がセンサと相互作用を起こした時間 ToA (Time of Arrival)もしくは各ピクセルの電荷蓄積時間 ToT (Time over Threshold)を得ることができる。各ピクセルに入射する放射線を 1 つずつ検出しそのエネルギーを測定することができる Tracking モードで撮影を行った。この機器の注意点として、教育用としてセンサの性能仕様を一部緩和されている点がある。具体的にはチップの性能評価は全有効面積の 50 %でのみ行われていること、性能評価が行われたエリア内で不良ピクセルの列が 1 列含まれる場合があること、20 ピクセルまでの不良ピクセルクラスターが含まれる場合があること、等である。

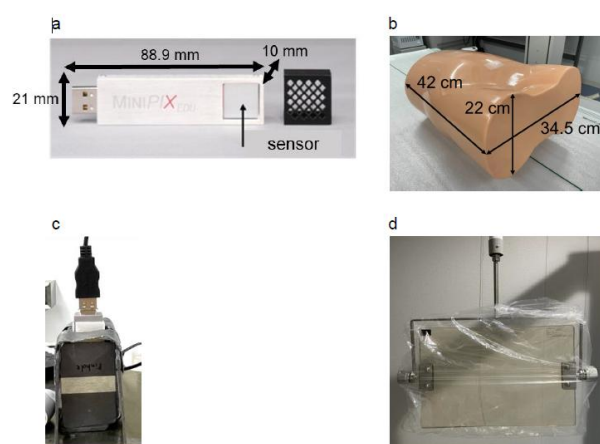


図 1 a) 本研究で使用した MiniPIX EDU 放射線可視化カメラセット。b) 本図は本研究で使用した骨盤ファントムを示す。軟部組織はポリウレタン樹脂、骨はエポキシ樹脂である。c) 鉛板を用いて、放射線可視化カメラは上下左右の全方向から遮蔽された。d) 透視検査で一般的に使用される放射線防護板。この板の主成分はアクリルで、鉛を含むアクリルが使用されている。

X 線透視 C アーム装置には DR CALNEO CROSS (Fuji Film) を用いた。図 2 は鉛遮蔽の様子を示しており、コリメータの前方に上下左右 4 枚取り付けた。その他には骨盤部ファントム (41926-080 京都科学)、画像処理には ImageJ ver.153k を使用した。

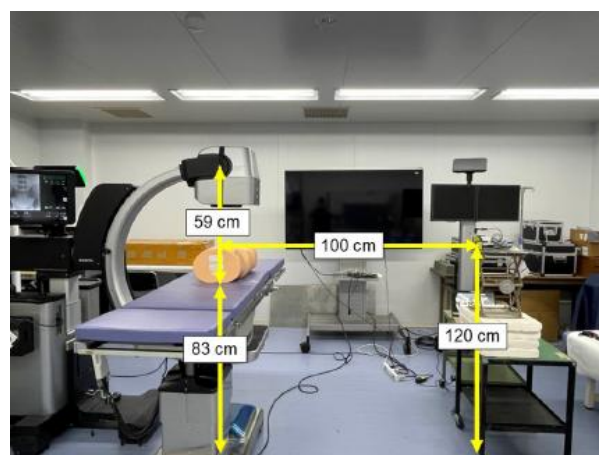


図 2 各装置の幾何学的配置を示す。この図では、C アーム装置と骨盤ファントムが左側に、半導体カメラが右側に設置されている。カメラは床から 120 cm の位置に設置されている。カメラと照射野中心との距離は 100 cm である。床か

らベッド面までの距離は 83 cm である。X 線焦点からベッド面までの距離は 59 cm である。

照射条件について、放射線可視化カメラを用いたイメージングにおいて適切な照射条件を知る目的で、次の 3 つの条件を変化させて実験を行った。

Table 1 Irradiation factor

Parameter	Unit
Tube voltage	70 kV
Tube current	25 mA
Irradiation time	1 s
Number of exposure	10 times
Diameter of pinhole	1 mm
Depth of pinhole	2 mm
Sensor to pinhole	1.7 cm
Viewing angle	61 °
Irradiation field size (focus to FPD: 105 cm)	Max: 53 cm×52 cm
Direction	AP
X-ray tube to couch	59 cm
Couch to phantom	83 cm
Couch to sensor	100 cm
Sensor to floor	120 cm

Abbreviations: FPD, flat panel detector;
AP, anterior-posterior.

まず、図 3 の含鉛アクリル製の放射線防護板の高さを変えて設置した。射出口と防護板の下端の高さが同じ場合(0 cm)と防護板が射出口よりも 5 cm 長く覆っている場合を測定した。

次に照射野の大きさによる違いを評価する目的で X 線撮影の照射野範囲を変えて結果を評価した。この X 線 C アーム装置における最大の範囲 53 cm×52 cm と 10 cm×10 cm の場合 (いずれも焦点から 105 cm 離れた面での面積) で撮影し評価した。

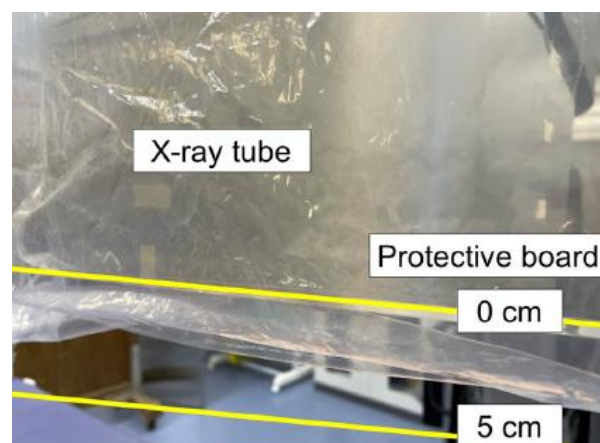


図 3 放射線防護板の配置。この状態で、窓の下端と防護板の下端が揃っている状態を 0 cm、防護板が窓の下端から 5 cm 下まで伸びている状態を 5 cm とした。

3 つ目にファントムの有無による違いとして寝台にファントムを置いた場合と置かない場合で結果を評価した。

ここで 画像処理についてであるが、実験から得られたデータは 256×256 のデータであるが、II-1.で述べた不良ピクセルの列が確認されたため不良ピクセルの 1 列はデータとして採用せずに 256×255 のデータを画像化している。ピクセルごとに得られたテキストデータを強弱に合わせてグレースケール画像化し、それをカラー表示した。この 2 回のそれぞれの処理後に Median フィルタを用いて画像を平滑化した。平滑する値は 10 ピクセルとした。次章の III.結果で示す画像は検出器と同じ位置からスマホで撮影した写真と出力画像とを重ね合わせたものである。

C. 結果

C - 1 基本的な条件における画像

RGB カメラで撮影した画像と半導体カメラで得られたテキストデータから作成した画像を重ね合わせた。最大を 200 カウント、最小を 0 カウントとしてカラー出力した。図 4 を見て分かるように、焦点側から寝台側に向かってコリメータ、射出口、ファントム表面、の 3 カ所が主な散乱線源であった。図 5 は図 4 のプロファイルである。プロットしたのは画像上の白色点線上 256 ピクセルである。グラフにおいて縦軸はピクセル値、横軸はコリメータ側を 0 としたピクセル番号を示している。出力の最大値と最

小値は図 5 と同様である。この図 6 においてコリメータ、射出口、ファントムに対応するピークが見られた。

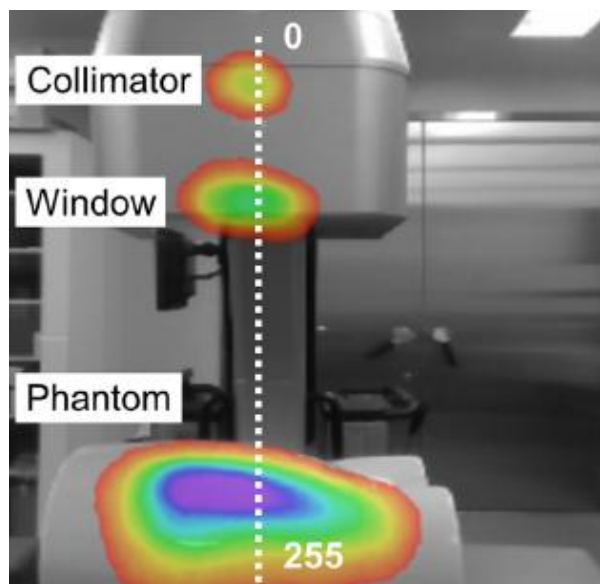


図 4 放射線可視化カメラから得られたデータと可視光カメラからの画像を重ね合わせた画像。散乱線の主な発生源は、焦点側からコリメータ、窓、そしてファントム表面である。

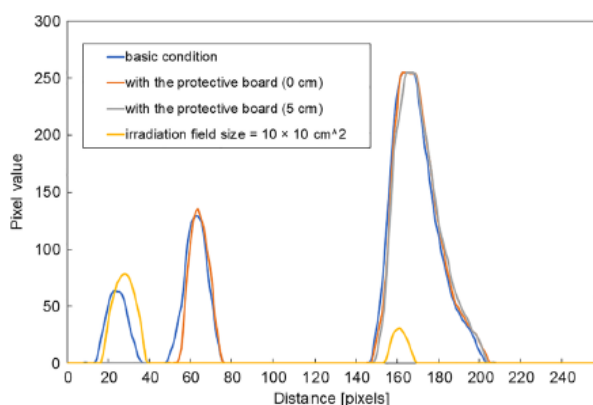


図 5 ビーム軸上の散乱線源画像のプロファイル。

プロファイル中の線は、図 4 の白い点線に沿って 256 ピクセルをプロットした結果である。グラフの縦軸はピクセル値、横軸はコリメータ側を 0 としたピクセル番号を表している。縦軸のピクセル値は散乱線のカウント数の相対値である。この図では、放射線データは最小値が 0 カウント、最大値が 591 カウントでした。最大ピクセル値を 256 に換算することで、256 段階の

ピクセル値となった。この画像には、コリメータ、窓、ファントムに対応するピークが見られる。同様に、オレンジ、灰色、黄色の線は、各条件における出力結果の比較を示す。

C-2 防護板の変化

防護板が 0 cm の場合はコリメータにおける散乱が遮蔽され、5 cm の場合はコリメータに加えて射出口における散乱も遮蔽することができた。X 線管の高さに防護板を設置することで、コリメータと射出口からの散乱線を低減できた。

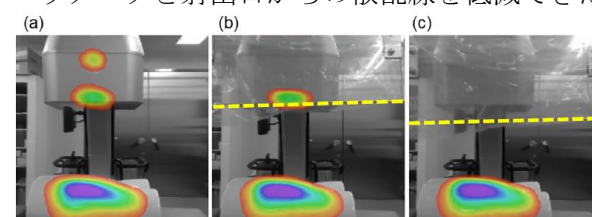


図 6 防護板の位置による散乱線源の違い。防護板を下げると (a 防護板なし b 0 cm c 5 cm)、散乱放射線源からの散乱放射線をより効果的に遮蔽できるようになった。

C-3 照射野の大きさ

照射野の大きさによる違いを計測した場合、画像において射出口とファントムからの散乱線は減少したものの、コリメータからの散乱線は増加した。このことから、より小さい照射野で散乱線からの線量を低減できるため、診療に支障をきたさない範囲で照射野を絞ることの重要性を確認できた。

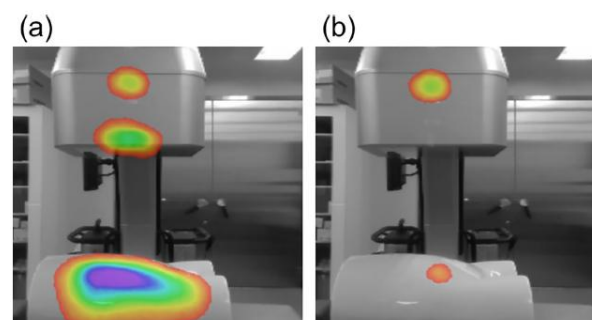


図 7 照射野の大きさによる散乱線源の違い
照射野が狭くなると、発生する一次放射線は減少した。その結果、散乱線の主な発生源であるファントムからの散乱線も減少した。

a 53 cm × 52 cm (2,756 cm²)

b 10 cm × 10 cm (100 cm²)

C-4 ファントムの有無

ファントムが無い場合、コリメータと射出口からの散乱の様子に目立った変化は見られず、わずかながら寝台において散乱線が発生した。散乱線のおよそ半分がファントムから発生していること、そしてファントムの有無でX線管内の散乱線は変わらないことが分かった。

D. 考察

防護板設置の高さによる違いについて、防護板がX線管内からの散乱線の低減に効果的であることが分かった。今回の実験ではコリメータと射出口を散乱線源とする散乱線において遮蔽効果が確認できた。防護板の下端を射出口に合わせる場合と余分に長く出して低い高さで設置した場合とを比較すると、後者の方がより有用であった。そのため、手技の妨げにならない範囲で防護板を低く設置することが望まれる。臨床の場では、防護カーテンは患者に触れる高さまで降ろしていることがある。そのことを考慮して、今後は防護板をよりファントムに近づけて患者からの散乱線の低減を検討したい。

に照射野の大きさによる違いについて、照射野を小さくするとファントムからの散乱線低減が確認できた。コリメータからの散乱線は増加した。この原因としては照射野を絞ったときに、内向きに移動する照射野絞りとの一次X線との散乱の増加によるものと考えられる。

最後の実験はファントム設置の有無に関する比較であった。ファントム設置の有無どちらでも散乱線源の画像化を実現できた。それらを比較すると、どちらの場合でもX線管内からの散乱線は一定であることが画像から分かった。散乱源画像から寝台が散乱線源になり得ることも示された。

現状の課題として、再現性の向上が挙げられる。そのためにピンホール固定法の見直し、半導体カメラとRGBカメラの視野の一致の精度向上を目指す。これは3Dプリンタで土台を作成することにより解決を図る。1つの土台にピンホール、半導体カメラ、RGBカメラの3つを同時に設置することが望ましい。

また、RGBカメラに関しては、視野が広いカメラを用いることを検討する。これは視野が広いと、臨床の場で広範囲の散乱線防護に利用できるからである。

先ほど述べた防護板の高さも今後の実験で検

討する必要がある。一般的な透視手技で使われるX線管に付け外し可能なタイプの防護カーテンの高さを参考に、文献を基に複数の高さを検討する必要がある。カーテンとは異なり、本研究で用いているのはキャスター付きの防護板である。キャスターの部分が5つに枝分かれして術者の足元で場所を取る欠点がある。その点ではX線管とファントムからの術者の散乱線防護の他の方法も検討すべきである。

コリメータについても今回用いたピンホールコリメータ以外にも試すべきである。例えば、1つのコリメータ内に複数のピンホールが空いているものや、コーデッドマスク方式¹⁸⁾も有用であると考ええる。

E. 結論

一連の実験を通して、X線撮影においてピンホールを用いた半導体カメラで散乱線源の位置と散乱線分布をイメージングできた。照射条件の変化によって散乱線マップも変化し、術者の散乱線防護方法の検討に利用できると考える。

参考文献

- 1) Cosette M Stahl, Quinn C Meisinger, Michael P Andre, et al: Radiation Risk to the Fluoroscopy Operator and Staff. AJR Am J Roentgenol 2016; 207: 737-744
- 2) G Bratschitsch, L Leitner, G Stüklischweiger, et al: Radiation Exposure of Patient and Operating Room Personnel by Fluoroscopy and Navigation during Spinal Surgery. Scientific Reports 9 2019; Article number: 17652
- 3) Alexandre Fogaça Cristante, Fábio Barbieri, Almy Anacleto Rodrigues da Sliva, et al: RADIATION EXPOSURE DURING SPINE SURGERY USING C-ARM FLUOROSCOPY. Acta Ortop Bras. 2019 Jan-Feb; 27(1): 46-49
- 4) Hajime Ito, Ikuo Kobayashi, Kazutoshi Watanabe, et al; Evaluation of scattered radiation from fluoroscopy using small OSL dosimeters. Radiol Phys Technol. 2019; 12: 393-400
- 5) Okasana Lesyuk, Patrick Emmanuel Sousa, Sónia Isabel do Espírito Santo Rodrigues, et al: Study of scattered radiation during fluoroscopy in hip surgery. Radiol Bras. 2016; 49: 234-240
- 6) Chuanpeng Wu, Liang Li, Senior Member IEEE: First Demonstration of Compton Camera Used for X-Ray Fluorescence Imaging. IEEE Trans Med Imaging 2023; 42: 1314 -1324

- 7) Akihisa Omata, Miho Masubuchi, Nanase Koshikawa, et al: Multi-modal 3D imaging of radionuclides using multiple hybrid Compton cameras. Scientific Reports 12 2022; Article number: 2546
 - 8) Koichi Chida, Takeshi Takahashi, Daisuke Ito, et al: Clarifying and visualizing sources of staff-received scattered radiation in interventional procedures. AJR Am J Roentgenol 2011; 197: W900-3
 - 9) Benjamin Fahimian, Andrew Ceballos, Silvan Türkcan, et al.: Seeing the invisible: Direct visualization of therapeutic radiation beams using air scintillation. Medical Physics 2013; 41: 010702
 - 10) Akihisa Omuta, Jun Kataoka, Kazuya Fujieda, et al.: Performance demonstration of a hybrid Compton camera with an active pinhole for wide-band X-ray and gamma-ray imaging. Nature Scientific Reports 2020; 10: 14064
 - 11) J. Kataoka, A. Kishimoto, T. Nishiyama, et al.: Handy Compton camera using 3D position-sensitive scintillators coupled with large-area monolithic MPPC arrays. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 2013; 732: 403-407
 - 12) Laura Antonia Cerbone, Luigi Cimmino, Antonio Sarno, et al: Monte Carlo and experimental evaluation of Timepix4 compact gamma camera for coded aperture nuclear medicine imaging with depth resolution. Physica Medica; 113 (2023): 102663
 - 13) Nicholas Stoffle, Lawrence Pinsky, Martin Kroupa, et al.: HERA: Timepix-based radiation environment measurements aboard the International Space Station. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 2015; 782: 143-148
 - 14) Kroupa M, Campbell-Ricketts T, George SP, et al: Particle showers detected on ISS in Timepix detectors. Life Sci Space Res 2023; 39: 52-58
 - 15) S. Procz, C. Avil, J. Fey, et al.: X-ray and gamma imaging with Medipix and Timepix detectors in medical research. Radiation Measurements 2019; 127: 106104
 - 16) Polad M Shikhaliev, Shannon G Fritz, John W Chapman: Photon counting multienergy x-ray imaging: effect of the characteristic x rays on detector performance: Med Phys. 2009; 36: 5107-19
 - 17) Anton S Tremsin, John V Vallerger, Oswald H W Siegmund, et al: Photon-counting MCP/Timepix detectors for soft X-ray imaging and spectroscopic applications. J Synchrotron Radiat. 2021; 28: 1069-1080
 - 18) R. J. Proctor, G. K. Skinner, A. P. Willmore: The design of optimum coded mask X-ray telescopes. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 1979; 187: 633-643
- F. 健康危険情報
なし
- G. 研究発表
1. 論文発表
 1. Sakai, M; Fujibuchi, T; Lee, H; Han, D, Imaging of scattered radiation sources in X-ray radiography using a semiconductor radiation visualization camera, Radiological Physics and Technology, 18, 308 – 315, 2025.
 2. 学会発表
 1. Mayu Sakai, Hyojin Lee, Toshioh Fujibuchi, Hiroyuki Arakawa, Consideration of realtime imaging of scattered radiation sources in X ray fluoroscopy using a semiconductor camera, The 80th annual meeting of the JSRT, Yokohama, April 11-14, 2024.
 2. Mayu Sakai, Toshioh Fujibuchi, Consideration of real-time imaging of scattered radiation sources in X-ray fluoroscopy using a semiconductor camera, KYUDAI NOW 2024, Bandung, Indonesia, 2024.8.28.
 3. 境 真由、Lee Hyojin、藤淵 俊王、荒川 弘之、Han Donghee、可搬型半導体式放射線可視化カメラによるX線透視での散乱線源のイメージングの検討. 第1回日本放射線医療技術学術大会(JCRTM 2024), 沖縄, 2024年10月31日-11月3日.
 4. Mayu Sakai, Toshioh Fujibuchi, Consideration of real-time imaging of scattered radiation sources in X-ray fluoroscopy using a semiconductor camera, Kyushu University Asia week, Fukuoka, 2024.11.5-9.
- H. 知的財産権の出願・登録状況
(予定を含む。)
1. 特許取得
なし
 2. 実用新案登録

なし

3.その他
なし

研究成果の刊行に関する一覧表

書籍

著者氏名	論文タイトル名	書籍全体の編集者名	書 籍 名	出版社名	出版地	出版年	ページ
なし							

雑誌

発表者氏名	論文タイトル名	発表誌名	巻号	ページ	出版年
Toshioh Fujibuchi	Study on Radiation Protection Education al Tool Using Real-Time Scattering Radiation Distribution Calculation Method with Ray Tracing Technology	Information	16	266	2025
Noguchi K, Fujibuchi T, Han D	Effectiveness of radiation protection educational material during angiography using visualization of scatter	Radiological physics and technology			2025
Hyojin Lee, Toshioh Fujibuchi, Donghee Han, Hiroyuki Arakawa	Visualization of the scatter radiation in real time using a high-sensitivity CMOS camera with pinhole collimator	Health and Technology			2025
Hizukuri, K; Fujibuchi, T; Han, DH; Arakawa, H; Furuta, T	Directional vector-based quick evaluation method for protective plate effects in X-ray fluoroscopy (DQPEX)	Radiological physics and technology	18	196-208	2024

Sakai, M; Fujibuchi, T; Lee, H; Han, D	Imaging of scattered radiation sources in X-ray radiography using a semiconductor radiation visualization camera	Radiological physics and technology	18	308-315	2024
Toshioh Fujibuchi, Hiroyuki Arakawa, Choirul Anam	Development of a Real-Time Radiation Exposure Estimation Method Using a Depth Camera for Radiation Protection Education	Radiation	4	261-275	2024
Toshioh Fujibuchi, Misaki Nakashima, Hiroyuki Arakawa, Hitoshi Miyazaki, Choirul Anam	Evaluation of radiation protection effectiveness in a cardiac angiography room using visualized scattered radiation distribution.	Journal of radiological protection	44	031510	2024
Arakawa H, Fujibuchi T, Kaneko K, Okada Y, Tomisawa T	Radiation-training system with a custom survey-meter mock-up in a browser-based mixed reality environment	Nuclear Engineering and Technology,	56	2428-2435	2024
矢野 祐二, 藤淵 俊王, 荒川 弘之	含鉛および無鉛素材の放射線防護衣における透過X線スペクトルや鉛当量,均一度の評価	日本放射線技術学会雑誌	80	944-954	2024
藤淵 俊王	水晶体被ばくに関わる近年の動向	日本放射線技術学会 放射線防護部会誌	24	14 - 31	2024
藤淵 俊王	水晶体被ばくに関わる近年の動向	インナービジョン	40	22 - 23	2025